

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LA PLANTA DE
TRATAMIENTO DE AGUA CON CENIZAS PROCEDENTE DEL
ÁREA DE COGENERACIÓN DEL Ingenio San Antonio**

TRABAJO MONOGRÁFICO PRESENTADO POR:

Br. Jennifer Dayana González Doña

Br. Orlando José Varela Lugo

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

TUTOR:

Ing. Javier Ramírez

ASESOR:

Ing. Silvio Varela

Noviembre, 2022.

Opinión del catedrático guía

Por este medio hago constar que he brindado seguimiento al desarrollo de la monografía realizada por los bachilleres; Jennifer Dayana González Doña y Orlando José Varela Lugo, titulada: **Evaluación técnica y económica de la planta de tratamiento de agua con cenizas procedente del área de cogeneración del Ingenio San Antonio.**

En lo concerniente a la implementación de los conocimientos adquiridos durante sus estudios de la carrera de Ingeniería, considero que los autores han implementado conocimientos adquiridos en sus estudios, siendo estos; la aplicación de balances de masa, control de calidad, análisis fisicoquímicos, estudio económico, y además requirieron de una preparación extra (mediante el autoestudio y/o capacitación), para poder concluir con éxito su trabajo monográfico.

Es importante destacar que todo lo presentado en el estudio surgió de una necesidad planteada por la empresa, y se propuso a los bachilleres González y Varela durante la realización de pasantía profesional, para que fuese tratada como una investigación para la ejecución de su monografía. Por tanto, los resultados alcanzados contribuirán a la mejora del proceso de tratamiento de agua de cenizas.

Las actividades realizadas y presentadas en el documento cumplen con lo establecido en la normativa de culminación de estudio, de la Universidad Nacional de Ingeniería. Por lo tanto, aseguro que ambos bachilleres están preparados para optar al título de Ingeniero Químico.

Sin más a que referirme, me despido.

Atentamente

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Javier Enrique Ramírez Meza', written over a yellow rectangular background.

Javier Enrique Ramírez Meza
Tutor

AGRADECIMIENTO

A nuestra alma máter, Universidad Nacional de Ingeniería, por brindarnos un entorno de desarrollo académico, profesional y social.

A la Facultad de Ingeniería Química, por encargarse de entregarnos el conocimiento que se empleó para realizar este trabajo monográfico, y el conocimiento que se aplicará a lo largo de nuestra vida profesional.

A nuestro tutor, el ingeniero Javier Ramírez, quien ha sido un gran docente y consejero durante todo nuestro recorrido universitario. Por todo el apoyo brindado, la entrega y el compromiso durante la realización de este trabajo.

A nuestro asesor, el ingeniero Silvio Varela, quien siempre estuvo presto a apoyarnos, aclararnos dudas y escuchar nuestras opiniones durante toda la realización de este trabajo; por toda la experiencia compartida y deseos de nuestra superación.

Al ingeniero Marcelo Moncada, por el apoyo brindando durante nuestra experiencia en el Ingenio San Antonio al brindarnos las herramientas y el espacio necesario para el desarrollo adecuado de este trabajo y la adquisición de conocimientos relacionados a la industria azucarera en Nicaragua.

Al Ingenio San Antonio, por permitirnos desarrollar este trabajo monográfico en sus instalaciones. Esta experiencia nos permitió emplear y ampliar nuestros conocimientos, haciéndonos crecer como profesionales y como individuos. Agradecemos la hospitalidad, supervisión y apoyo brindado por todo el personal con el cual nos relacionamos.

A nuestros padres, por ser el soporte de nuestras vidas como estudiantes y como individuos; quienes siempre se han encargado de entregar su apoyo y amor incondicional, preocuparse por nosotros en nuestros momentos más difíciles y brindarnos un entorno de desarrollo íntegro.

A nuestros amigos, por permitirnos compartir experiencias gratas durante nuestro tiempo en la universidad. Por todos los consejos y apoyo brindado a lo largo de estos años; por todas las risas y tristezas; por toda la confianza, y por cada momento que nos ha permitido llegar acá.

DEDICATORIA

A mi abuelo, Manuel Salvador Lugo Tamariz, siendo uno de los pilares principales en mi formación académica y personal, quien me ha inculcado través de anécdotas, consejos y práctica el valor del trabajo y el esfuerzo a lo largo de toda mi vida. Con quien tomé el compromiso de siempre aprender y “echarla toda”. Me enorgullezco de ser su nieto, y agradezco infinitamente cada momento que hemos compartido.

A mis sobrinos, Marcelo y Camila, quienes han sido una gran motivación en mi vida. Espero verlos cumplir cada una de sus metas y sueños, que me vean como alguien con quien pueden conversar o pedir un consejo, y hacerlos sentir orgullosos de ser mis sobrinos, a como yo estoy orgulloso y agradecido de ser su tío.

A mis padres, Ivette Lugo y Silvio Varela, quienes se han encargado de entregarme todas las condiciones para poder crecer académica, laboral y personalmente. Por todos sus consejos, abrazos, largas pláticas, tiempo de calidad y amor incondicional he podido convertirme en quien soy, quien aspira a mejorar con cada día que pasa; les agradezco por siempre.

Orlando Varela Lugo.

DEDICATORIA

A todas las personas que confiaron en mí en algún momento de su vida, y que, con su creencia, me han ayudado a crecer y a tener fe en mis capacidades.

A mi padre, Carlos González, que es uno de mis mayores ejemplos a seguir: inteligente, dedicado, esforzado, carismático, y siempre ingenioso en el trabajo y en la vida. Porque siempre me remarcó la importancia del estudio, me llenó de alegría, y siempre vio en mí alguien capaz de llegar lejos.

A mi madre, Elizabeth Doña, por aconsejarme y darme el espacio para poder enfocarme en mis metas. Por enseñarme día con día lo que es ser bondadoso y humilde, que no hay excusas para perder la esencia del carácter, por siempre pensar en los demás sin importar la situación. Por ser la mejor madre que Dios pudo darme.

Por último, eternamente agradecida con mi abuelita, Gerónima Chavarría, que su recuerdo hace esforzarme cada día para ser la persona que ella siempre vio en su nieta; abrazos hasta el cielo, la seguiré frecuentando en mis sueños.

Jennifer González Doña.

RESUMEN

El presente trabajo monográfico tiene como principal objetivo evaluar de forma técnica y económica la planta de tratamiento de agua con cenizas del área de cogeneración del Ingenio San Antonio, ubicado en el municipio de Chichigalpa, Chinandega, Nicaragua. El agua obtenida de este proceso tiene como funciones principales limpiar tolvas recolectoras de cenizas generadas durante la combustión del bagazo, y limpiar los gases de combustión a la salida del proceso por medio de *scrubbers*, generando beneficios ambientales y económicos.

Se realizó la caracterización fisicoquímica de las corrientes del proceso, midiendo y calculando parámetros como: densidad de la mezcla, sólidos en base seca, contenido de humedad, concentración de sólidos suspendidos totales y disueltos, pH, temperatura, dureza, alcalinidad total, índice de Ryznar y masa de lodos. Se realizó la comparación de condiciones registradas en la planta de tratamiento para la zafra 2020-2021 con las condiciones determinadas durante la zafra 2021-2022.

Utilizando un caudalímetro ultrasónico PT900 $\pm 1\%$, se midió el caudal volumétrico durante la zafra 2021-2022 para la corriente de agua de entrada al sistema y la corriente de lodos concentrados del clarificador, registrándose 1 020 m³/h y 105 m³/h, respectivamente. Para determinar los caudales volumétricos de las corrientes restantes en ambos escenarios, se desarrollaron balances de materia en estado estacionario debido a la continuidad del proceso. El caudal volumétrico de entrada al sistema de tratamiento fue 788 m³/h para la zafra 2020-2021.

Por medio de pruebas de cilindro y análisis del comportamiento de remoción de sólidos a nivel de planta, se verificó que la dosis óptima de floculante es de 1 ppm para el caudal de 1 020 m³/h. Así mismo, se logró determinar la eficiencia de remoción de sólidos suspendidos totales del clarificador, el filtro rotativo y la planta siendo esta última de 99.42% y 99.80%, con un factor de capacidad de 71.64% y 92.73% para las zafras 2020-2021 y 2021-2022 respectivamente, indicando un aumento del 21.09% de la capacidad de la planta.

Finalmente, se realizó una evaluación económica del proyecto de reingeniería. La inversión total realizada en la zafra 2020-2021 fue de \$60 058.75, mientras que los costos totales en el primer año de proyecto, considerando costos de energía, mano de obra, costos de mantenimiento, costos de transporte y materia prima (floculante), sumaron \$287 341.10. Los ingresos totales proyectados al primer año corresponden a un total de \$324 967.00, considerando ahorros en transporte y mantenimiento. Como resultado, se obtuvo una relación beneficio-costado de 1.07, indicando viabilidad económica en la reingeniería realizada.

A través de la reingeniería, el Ingenio San Antonio logró disminuir de 94 a 30 viajes de volquetes diarios para el manejo de los lodos producto de la planta de tratamiento de agua con cenizas. Para alcanzar el objetivo del ingenio de 16 viajes al día, se recomienda la instalación de un controlador *feedforward* para dosificar floculante basándose en la concentración entrante de sólidos suspendidos totales.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|-----|
| OPINIÓN DEL CATEDRÁTICO GUÍA | i |
| AGRADECIMIENTO | ii |
| DEDICATORIA | iii |
| DEDICATORIA | iv |
| RESUMEN..... | v |
| SIGLAS Y ABREVIATURAS..... | 1 |
| 1. INTRODUCCIÓN | 5 |
| 2. OBJETIVOS | 7 |
| 2.1. Objetivo General | 7 |
| 2.2. Objetivos Específicos | 7 |
| 3. MARCO TEÓRICO..... | 8 |
| 3.1. Calderas..... | 8 |
| 3.1.1. Calderas pirotubulares..... | 8 |
| 3.1.2. Calderas acuotubulares | 8 |
| 3.2. Combustible | 9 |
| 3.2.1. Gas | 9 |
| 3.2.2. Aceite..... | 9 |
| 3.2.3. Biomasa..... | 9 |
| 3.3. Parámetros de calidad de agua de lavado | 10 |
| 3.3.1. Sólidos suspendidos totales y sólidos totales disueltos | 11 |
| 3.3.2. pH | 11 |
| 3.3.3. Dureza | 11 |
| 3.3.4. Alcalinidad | 11 |
| 3.3.5. Temperatura | 12 |
| 3.3.6. Índice de incrustación | 12 |
| 3.4. Balance de materiales..... | 13 |
| 3.5. Filtración..... | 13 |
| 3.5.1. Factores que influyen en la filtración..... | 14 |
| 3.5.2. Filtro rotativo | 14 |
| 3.5.3. Filtro estático | 15 |
| 3.6. Floculación | 15 |
| 3.6.1. Tipos de floculante..... | 15 |

| | | |
|---------|---|----|
| 3.6.2. | Pruebas de jarra | 15 |
| 3.6.3. | Pruebas de cilindros | 16 |
| 3.7. | Clarificación..... | 17 |
| 3.7.1. | Carga superficial..... | 17 |
| 3.7.2. | Lodos concentrados..... | 17 |
| 3.8. | Cogeneración..... | 18 |
| 3.9. | Descripción del proceso de cogeneración..... | 19 |
| 3.9.1. | Producción de vapor..... | 19 |
| 3.9.2. | Manejo de bagazo | 20 |
| 3.9.3. | Alimentación de agua | 20 |
| 3.9.4. | Generación de energía eléctrica..... | 21 |
| 3.10. | Sistemas de lavado de gases | 23 |
| 3.10.1. | <i>Scrubbers</i> | 23 |
| 3.11. | Tolvas recolectoras de cenizas | 23 |
| 3.12. | Descripción del proceso de tratamiento de agua con cenizas | 24 |
| 3.12.1. | Lavado de gases y tolvas | 24 |
| 3.12.2. | Tratamiento de agua con cenizas..... | 26 |
| 3.13. | Métodos de análisis financieros | 28 |
| 3.13.1. | Flujo Neto de Efectivo..... | 28 |
| 3.13.2. | Depreciación..... | 29 |
| 3.13.3. | Tasa Mínima Aceptable de Rendimiento..... | 30 |
| 3.13.4. | Período de Recuperación | 30 |
| 3.13.5. | Valor Presente Neto | 31 |
| 3.13.6. | Relación Beneficio-Costo | 32 |
| 4. | METODOLOGÍA..... | 33 |
| 4.1. | Ubicación de los puntos de muestreo | 33 |
| 4.2. | Caracterización fisicoquímica de afluentes y efluentes | 36 |
| 4.2.1. | Determinación de la densidad de la mezcla | 38 |
| 4.2.2. | Determinación de la masa de sólidos en base seca y humedad | 38 |
| 4.2.3. | Determinación del contenido de sólidos suspendidos totales | 39 |
| 4.2.4. | Determinación de la densidad de SST en base seca | 39 |
| 4.2.5. | Medición de potencial de hidrógeno y temperatura | 40 |
| 4.2.6. | Determinación de la concentración de sólidos totales disueltos | 40 |
| 4.2.7. | Determinación de la concentración de dureza total | 41 |

| | | |
|---------|--|----|
| 4.2.8. | Determinación de la alcalinidad total | 41 |
| 4.2.9. | Determinación del índice de incrustación | 42 |
| 4.2.10. | Determinación de la masa de lodos húmedos..... | 42 |
| 4.3. | Medición de caudal en las corrientes | 43 |
| 4.3.1. | Medición de caudal para la corriente de agua homogeneizada..... | 43 |
| 4.3.2. | Medición del caudal para la lodos concentrados UF..... | 44 |
| 4.3.3. | Medición de caudales de las corrientes de entrada y salida del tanque de recuperación de agua clarificada..... | 44 |
| 4.4. | Cálculo de caudal en las corrientes..... | 44 |
| 4.4.1. | Balance global del proceso | 45 |
| 4.4.2. | Cálculo de caudal de lodos hacia volquetes | 46 |
| 4.4.3. | Cálculo de caudal de agua clarificada | 47 |
| 4.4.4. | Cálculo de caudal de agua filtrada..... | 47 |
| 4.4.5. | Cálculo de caudal de rebozo del tanque de recuperación agua clarificada | 48 |
| 4.5. | Determinación de dosis óptima de floculante | 50 |
| 4.5.1. | Cálculo de carga superficial | 50 |
| 4.5.2. | Preparación de floculante | 51 |
| 4.5.3. | Pruebas de cilindros | 51 |
| 4.6. | Determinación de eficiencia remoción del proceso | 53 |
| 4.6.1. | Eficiencia de filtro rotativo | 53 |
| 4.6.2. | Eficiencia de clarificador | 53 |
| 4.6.3. | Eficiencia general del proceso | 54 |
| 4.6.4. | Factor de capacidad | 54 |
| 4.7. | Análisis de la relación Beneficio-Costo..... | 54 |
| 4.7.1. | Flujo Neto de Efectivo..... | 55 |
| 4.7.2. | Cálculo de Período de Recuperación | 58 |
| 4.7.3. | Cálculo de Valor Presente Neto..... | 58 |
| 4.7.4. | Cálculo de Relación Beneficio-Costo..... | 58 |
| 5. | PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS..... | 59 |
| 5.1. | Caracterización fisicoquímica de afluentes y efluentes | 59 |
| 5.1.1. | Características físico-químicas en corrientes del FI-250 01 | 59 |
| 5.1.2. | Características físico-químicas en corrientes del CL-250 | 66 |
| 5.2. | Determinación de caudales en las corrientes..... | 72 |
| 5.2.1. | Caudales medidos | 72 |

| | |
|--|----|
| 5.2.2. Caudales calculados..... | 73 |
| 5.3. Determinación de dosis óptima de floculante..... | 74 |
| 5.3.1. Cálculo de carga superficial..... | 74 |
| 5.3.2. Pruebas de cilindro..... | 74 |
| 5.4. Determinación de la eficiencia de remoción del proceso..... | 78 |
| 5.5. Análisis financiero..... | 80 |
| 5.5.1. Inversión..... | 80 |
| 5.5.2. Costos..... | 80 |
| 5.5.3. Ingresos..... | 81 |
| 5.5.4. Relación Beneficio-Costo..... | 82 |
| 6. CONCLUSIONES..... | 84 |
| 7. RECOMENDACIONES..... | 85 |
| REFERENCIAS..... | 86 |
| APÉNDICES..... | 90 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|-----|
| Tabla 3.1 Composición química y física típica del bagazo | 10 |
| Tabla 3.2 Características del agua dado el índice de Ryznar | 13 |
| Tabla 3.3 Cálculo de FNE | 29 |
| Tabla 4.1 Puntos de muestro correspondientes a las corrientes involucradas ... | 33 |
| Tabla 4.2 Parámetros de caracterización de afluentes y efluentes | 37 |
| Tabla 4.3. Corrientes involucradas en el balance global de proceso..... | 46 |
| Tabla 4.4 Corrientes del balance de materia del CL-250 y el PU-276..... | 48 |
| Tabla 4.5 Corrientes involucradas en el balance de materia del TK-474 03 | 48 |
| Tabla 4.6: Dosificaciones de floculante al 0,1% en cada juego de probetas | 52 |
| Tabla 4.7: Descripción de los tipos de costo | 55 |
| Tabla 5.1 Características del agua homogeneizada para Z21-22 | 71 |
| Tabla 5.2. Caudales volumétricos medidos de la planta de tratamiento de agua con cenizas (Z20-21 vs Z21-22)..... | 72 |
| Tabla 5.3. Caudales volumétricos de la planta de tratamiento de agua con cenizas (Z20-21 vs Z21-22) calculados por medio de balances de materia | 73 |
| Tabla 5.4 Resultados de cálculo de carga superficial para Z21-22 | 74 |
| Tabla 5.5. Velocidad de sedimentación y concentración de SST final para diferentes concentraciones de floculante y carga de SST en agua homogeneizada | 75 |
| Tabla 5.6. Comparación de la eficiencia de remoción de sólidos en Z20-21 y Z21-22. | 78 |
| Tabla 5.7. Factor de capacidad para Z20-21 y Z21-22..... | 79 |
| Tabla 5.8. Descripción de inversión realizada por reingeniería. | 80 |
| Tabla 5.9. Coste histórico de los viajes de volquetes y proyección respecto al paso del tiempo..... | 81 |
| Tabla 5.10. Costos totales por la existencia de la PTAC..... | 81 |
| Tabla 5.11. Beneficios económicos generados por la PTAC..... | 82 |
| Tabla 5.12. Indicadores económicos de la reingeniería en la planta de tratamiento de agua con cenizas..... | 82 |
| | |
| Tabla A.1. Parámetros de calidad de agua clarificada en Z20-21 | 90 |
| Tabla A.2. Parámetros de calidad de agua clarificada en Z21-22 | 91 |
| Tabla A.3. Contenido de Sólidos suspendidos totales en agua clarificada, lodos concentrados, y lodos hacia volquetes en Z21-22..... | 93 |
| Tabla A.4. Comparación de parámetros de calidad del agua para Z20-21 y Z21-22 con valores promediados..... | 94 |
| Tabla E.1 Comportamiento de la altura y velocidad de sedimentación respecto al tiempo a diferente dosificación de floculante para 0,67% SST..... | 101 |
| Tabla E.2 Comportamiento de la altura y velocidad de sedimentación respecto al tiempo a diferente dosificación de floculante para 0,83% SST | 103 |
| Tabla E.3 Comportamiento de la altura y velocidad de sedimentación respecto al tiempo a diferente dosificación de floculante para 1,10% SST | 105 |

| | |
|--|-----|
| Tabla E.4 Comportamiento de la altura y velocidad de sedimentación respecto al tiempo a diferente dosificación de floculante para 1,16% SST..... | 107 |
| Tabla G.1. Detalle de ahorro generado por reducción en periodicidad de mantenimiento de equipos | 111 |
| Tabla H.1 Estado de resultados para la reingeniería en PTAC | 112 |
| Tabla H.2. Cálculo de relación Beneficio-Costo | 112 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|-----|
| Figura 3.1 Distribución de vapor principal generado por el ingenio San Antonio | 19 |
| Figura 3.2 Flujograma del proceso de cogeneración. Elaboración propia..... | 22 |
| Figura 3.3 Flujograma de proceso de tratamiento de agua con cenizas. Elaboración propia..... | 25 |
| Figura 4.1 Ubicación de puntos de muestreo de la planta de tratamiento de agua con cenizas. Elaboración propia..... | 35 |
| Figura 4.2. Volumen de control de la planta de tratamiento de agua con cenizas | 45 |
| Figura 4.3 Volumen de control del clarificador | 47 |
| Figura 4.4 Volumen de control del tanque de recolección agua clarificada | 49 |
| Figura 5.1. Comportamiento de SST en agua homogeneizada en Z20-21 desde el 18 de febrero al 25 de marzo de 2021 | 60 |
| Figura 5.2. Comportamiento de SST en agua homogeneizada en Z21-22 desde el 20 de diciembre 2021 al 8 de febrero de 2022 | 61 |
| Figura 5.3. Comportamiento de SST en lodos concentrados de Z20-21 | 62 |
| Figura 5.4. Comportamiento de SST en lodos concentrados de zafra Z21-22... .. | 63 |
| Figura 5.5. Comportamiento del contenido de humedad en los lodos a la salida del sistema en Z20-21 desde el 18 de febrero al 25 de marzo de 2021 | 64 |
| Figura 5.6. Comportamiento del contenido de humedad en los lodos a la salida del sistema en Z21-22 desde el 1 de enero al 1 de febrero de 2022 | 65 |
| Figura 5.7. Comportamiento del contenido de sólidos suspendidos totales en agua clarificada en Z21-22 desde el 6 de enero al 12 de febrero de 2022..... | 67 |
| Figura 5.8. Relación entre sólidos suspendidos totales en agua homogeneizada y en agua clarificada durante Z21-22 | 68 |
| Figura 5.9. Comportamiento de alcalinidad, dureza y sólidos disueltos totales en el agua clarificada para Z21-22 | 69 |
| Figura 5.10. Comportamiento de pH en el agua clarificada para Z21-22 | 70 |
| Figura 5.11. Comportamiento de temperatura en el agua clarificada para Z21-22 | 70 |
| Figura 5.12. Comportamiento del índice de Ryznar para Z21-22..... | 71 |
| Figura 5.13. Comportamiento de la sedimentación respecto a inyección de floculante para distintas concentraciones de SST. | 76 |
| Figura 5.14. Concentración final de SST bajo distintas dosificaciones de floculante a distintas cargas de SST en agua homogeneizada. | 76 |
| | |
| Figura E.1 Sedimentación de partículas a una carga de 0,67%SST respecto al tiempo para diferentes concentraciones de floculante..... | 102 |
| Figura E.2 Velocidad de sedimentación a una carga de 0,67% para diferentes concentraciones de floculante | 102 |
| Figura E.3 Sedimentación de partículas a una carga de 0,83% respecto al tiempo para diferentes concentraciones de floculante | 104 |

| | |
|--|-----|
| Figura E.4 Velocidad de sedimentación a una carga de 0,83% para diferentes concentraciones de floculante | 104 |
| Figura E.5 Sedimentación de partículas a una carga de 1,10% respecto al tiempo para diferentes concentraciones de floculante | 106 |
| Figura E.6 Velocidad de sedimentación a una carga de 1,10% para diferentes concentraciones de floculante | 106 |
| Figura E.7 Sedimentación de partículas a una carga de 1,16% respecto al tiempo para diferentes concentraciones de floculante | 108 |
| Figura E.8 Velocidad de sedimentación a una carga de 1,16% para diferentes concentraciones de floculante | 108 |

SIGLAS Y ABREVIATURAS

| | |
|--|--|
| ISA | Ingenio San Antonio |
| PTAC | Planta de tratamiento de agua con cenizas |
| Z20-21 | Zafra del año 2020-2021 |
| Z21-22 | Zafra del año 2021-2022 |
| PU-272 | Sistema de bombeo de agua homogeneizada |
| PU-276 | Sistema de bombeo de corriente de la lodos concentrados |
| PU-320 | Sistema de bombeo de agua de reposición |
| PU-330 | Sistema de distribución de agua clarificada |
| CL-250 | Clarificador de agua |
| FI-250 01 | Filtro rotativo |
| FI-250 02 | Filtro estático |
| TK-474 03 | Tanque de recolección de agua clarificada |
| TK-474 02 | Tanque de mezcla de floculante |
| TK-474 01 | Tanque de maduración |
| F ₁ , F ₂ , F ₃ | Inyección de floculante en corriente 1, 2 y 3, respectivamente |
| S ₁ , S ₂ , S ₃ | Agua clarificada a lavado de sistema de caldera 1, 2 y 3 |
| Rbz | Rebozo de tanque de recolección |
| T ₁ , T ₂ | Agua de reposición 1 y 2 |
| P ₁ | Punto de muestreo #1: agua homogeneizada |
| P ₂ | Punto de muestreo #2: agua filtrada |
| P ₃ | Punto de muestreo #3: Lodos concentrados |
| P ₄ | Punto de muestreo #4: Agua clarificada |
| P ₅ | Punto de muestreo #5: Lodos húmedos |
| SST | Sólidos suspendidos totales |
| STD | Sólidos totales disueltos |
| ASTM | American Society for Testing and Materials |
| ppm | Partes por millón |
| G | Conductividad eléctrica, $\mu\text{S}/\text{cm}$ |
| pH | Potencial de hidrógeno |
| pH _s | Potencial de hidrógeno estándar |
| Ca | Calcio |
| CaCO ₃ | Carbonato de calcio |
| H ₂ SO ₄ | Ácido sulfúrico |
| N-7128 | Floculante NALCO 7128 |
| EDTA | Ácido etilendiaminotetraacético |

| | |
|--------------------------|---|
| FC | Factor de capacidad |
| CS | Carga superficial |
| ρ_{ML} | Densidad de la mezcla, g/ml |
| m_{ML} | Masa de la mezcla, g |
| V_{ML} | Volumen de la mezcla, ml |
| V_M | Volumen de la muestra, L |
| C_{SST} | Concentración de SST, %m/m |
| C_{STD} | Concentración de sólidos totales disueltos, ppm |
| m_M | Masa de la muestra, g |
| m_{LBS} | Masa de sólidos en base seca, g |
| ρ_{LBS} | Densidad de lodos en base seca, g/ml |
| V_{Desp} | Volumen de agua desplazada, ml |
| C_{DT} | Concentración de dureza total, ppm $CaCO_3$ |
| C_{Ca} | Concentración de $CaCO_3$ por volumen de EDTA, mg/ml |
| C_{AT} | Concentración de alcalinidad total, ppm $CaCO_3$ |
| $C_{H_2SO_4}$ | Concentración de ácido sulfúrico, N |
| V_{EDTA} | Volumen utilizado de EDTA, ml |
| $V_{H_2SO_4}$ | Volumen utilizado de ácido sulfúrico, ml |
| PE_{CaCO_3} | Peso equivalente del $CaCO_3$, 50 mg/meq |
| IR _Z | Índice de Ryznar |
| A, B, C, D | Factores para el cálculo de IR _Z |
| m_{LF} | Masa de lodos finales, ton |
| m_{VLI} | Masa de volquete lleno, ton |
| m_{VV} | Masa de volquete vacío, ton |
| t_{LI} | Tiempo de llenado, min |
| t_F | Tiempo final, min |
| t_0 | Tiempo inicial, min |
| t_s | Tiempo de sedimentación, seg |
| Q_{T1}, Q_{T2} | Caudal volumétrico de la corriente T_1 y T_2 , m^3/h |
| Q_{S1}, Q_{S2}, Q_{S3} | Caudal volumétrico de la corriente S_1, S_2, S_3 , m^3/h |
| Q_{P1} y ρ_{P1} | Caudal y densidad de la corriente P_1 , m^3/h |
| Q_{P2} y ρ_{P2} | Caudal y densidad de la corriente P_2 , m^3/h |
| Q_{P3} y ρ_{P3} | Caudal y densidad de la corriente P_3 , m^3/h |
| Q_{P4} y ρ_{P4} | Caudal y densidad de la corriente P_4 , m^3/h |
| Q_{P5} y ρ_{P5} | Caudal y densidad de la corriente P_5 , m^3/h |
| Q_{T1}, Q_{T2} | Caudal de la corriente T_1 y T_2 respectivamente, m^3/h |
| Q_{S1}, Q_{S2}, Q_{S3} | Caudal de la corriente S_1, S_2, S_3 , m^3/h |
| Q_{RBZ} | Caudal de rebozo, m^3/h |

| | |
|-----------------------|---|
| Q_{Pi} | Capacidad de operación de la planta en cada zafra, m^3/h |
| $Q_{Máx}$ | Capacidad máxima de la planta, $1\ 100\ m^3/h$ |
| \dot{m}_{P5} | Caudal másico de lodos húmedos, ton/h |
| η_{FIROT} | Eficiencia del filtro rotativo, %m/m |
| η_{CL} | Eficiencia del clarificador, %m/m |
| η_{Planta} | Eficiencia de la planta, %m/m |
| m_{SSTP5} | Masa de SST en corriente P_5 , ton |
| m_{SSTP3} | Masa de SST en corriente P_3 , ton |
| m_{SSTP1} | Masa de SST en corriente P_1 , ton |
| m_{SSTP2} | Masa de SST en corriente P_2 , ton |
| m_{SSTP4} | Masa de SST en corriente P_4 , ton |
| A_{sup} | Área superficial del clarificador, m^2 |
| V_s | Velocidad de sedimentación |
| C_{N-7128} | Concentración de floculante, %m/m |
| m_{N-7128} | Masa de floculante, g |
| m_{H_2O} | Masa de agua como solvente, g |
| h_t | Altura de sedimentación en función del tiempo, cm |
| h_0 | Altura inicial de los sólidos en la probeta, cm |
| Δh | Diferencia entre altura inicial y altura de sedimentación respecto al tiempo, cm |
| $Cost_T$ | Costos totales, \$ |
| $Cost_P$ | Sumatoria de costos de producción, \$ |
| $Cost_{MyO}$ | Sumatoria de costos de mantenimiento y operación, \$ |
| $Cost_{Cdc}$ | Sumatoria de costos de control de calidad, \$ |
| P_{PI} | Sumatoria de las inversiones planificadas, \$ |
| $Cost_{Trans}$ | Costo unitario de viaje, \$/viaje |
| I_{Trans} | Ahorro generado por disminución de viajes de volquetes, \$ |
| $\Delta Trans$ | Diferencia entre viajes de volquetes actuales y proyectados, # de viajes |
| I_{Mant} | Ahorro generado por disminución en mantenimiento de equipos del sistema de calderas |
| $Cost_{Mant-equip}$ | Costo generado por mantenimiento individual de los equipos, \$/equipo |
| $\Delta Mant_{equip}$ | Diferencia entre la periodicidad de mantenimiento de cada equipo previo y post reingeniería |
| I_T | Ingresos totales, \$ |
| D_t | Depreciación, \$ |
| UAI | Utilidad antes de impuestos, \$ |
| UDI | Utilidad después de impuestos, \$ |
| FNE | Flujo neto de efectivo, \$ |

| | |
|--------------------|---|
| VPN | Valor presente neto |
| P | inversión inicial, \$ |
| P_{equip} | Inversión en materiales |
| V_{STO} | Valor de salvamento |
| n_D | Periodo de depreciación, anual |
| n_R | Periodo de recuperación, anual |
| TMAR | Tasa mínima aceptable de rendimiento |
| TIR | Tasa interna de retorno |
| i | TMAR, % |
| T_{INF} | Tasa de inflación |
| P_R | Premio al riesgo |
| B/C | Relación Beneficio-Costo |
| VPN_B | Valor presente neto de los beneficios, \$ |
| VPN_C | Valor presente neto de los costos, \$ |

1. INTRODUCCIÓN

El aumento del desarrollo industrial ha creado una mayor demanda de energía eléctrica. Debido a esto, se han buscado alternativas para su generación distintas al uso de energías térmicas no renovables, con el objetivo de satisfacer su demanda energética, disminuir sus costos y disminuir la contaminación ambiental.

Según la Revista Construir, 2017, la cantidad de energía generada en Nicaragua para el año 2016, fue de 4 700.75 GWh, siendo solamente 187.18 GWh (3.982%) correspondiente a la generación de energía por biomasa. Sin embargo, para el año 2021 este porcentaje aumentó considerablemente, proyectando así una generación de aproximadamente 481.29 GWh (11.95%) solamente por biomasa, lo que, según La Gaceta, 2017, corresponderían a US\$ 38 502 900 de energía renovable generada principalmente por los ingenios azucareros.

Por otro, lado la Empresa Nacional de Transmisión Eléctrica (ENATREL), publica que la energía eléctrica consumida en Nicaragua hasta noviembre del año 2021 proviene de las siguientes fuentes; energía no renovable (combustibles fósiles) en un 26.1%, un 21.54% de la energía eléctrica es importada y el 52.36% es generada por energía renovable: entre ellas se encuentran la energía solar con 0.47%, hidroeléctrica con 12.21 % geotérmica con 14.37%, eólica con 13.36% y biomasa con 11.95%.

La cantidad de energía por biomasa transmitida al país hasta el 14 de noviembre de 2021 fue de 4 027.75 GWh, teniendo la posibilidad de incrementar esta cifra con la zafra 2021-2022, debido al aumento de la generación de energía renovable por biomasa que se da en los ingenios azucareros durante zafras (ENATREL, 2021).

La biomasa es un combustible orgánico, generalmente proveniente de residuos, que es quemado para la generación de gases de combustión. Entre distintas biomazas se encuentran la leña, las briquetas, las astillas de distintos materiales, y el bagazo (residuo fibroso resultante de la extracción del jugo de caña).

Este último es la principal biomasa utilizada en la generación de energía en Nicaragua, la cual proviene de los ingenios azucareros ya que cuentan con plantas de cogeneración que aprovechan el bagazo, al grado de abastecer requerimientos energéticos en planta y vender energía eléctrica al país (CENNIC, 2021).

En el conglomerado de ingenios azucareros de Nicaragua, el Ingenio San Antonio destaca en el apartado energético, contando con una planta de cogeneración con una capacidad instalada de 79.3 MW. Utilizando bagazo en tiempo de zafra y eucalipto fuera de ella, el Ingenio San Antonio generó 195 799 482 KWh para la zafra 2020-2021, generando así US\$15 663 958 de ganancia (CENNIC, 2021).

La cogeneración por medio de bagazo ha permitido que el Ingenio San Antonio aproveche integralmente este recurso, que antes era simplemente desechado en los suelos, generando contaminaciones ácidas; simultáneamente, ha incidido de forma positiva en ahorros económicos, ya que ha permitido eliminar el uso de 21

953 606.16 galones de búnker desde el año 2004, aminorando de igual manera la contaminación del aire (Nicaragua Sugar, 2014).

La quema del bagazo genera subproductos tales como partículas no combustibles y cenizas, y en el caso de combustiones incompletas, generan gases sulfurosos y nitrosos, nocivos para el aire. En consecuencia, es de suma importancia remover las cenizas generadas y realizar lavados de gases de combustión, con el fin de evitar la contaminación del aire y ensuciamiento de las calderas. Estos lavados se realizan generalmente por vía húmeda, utilizando agua que permite la adherencia del conglomerado de subproductos de la combustión de bagazo, favoreciendo la limpieza de los equipos (Spirax Sarco, 2011).

El Ingenio San Antonio cuenta con una planta de tratamiento de agua con cenizas proveniente de los sistemas de lavado, la cual permite el aprovechamiento de los lodos tratados como abono (Izquierdo, Álvarez, y Rojas, 2019) y el agua tratada como agua de lavado para los lavadores de gases. Sin embargo, durante el período de Z20-21 dicha planta no operó en condiciones eficientes, provocando pérdidas significativas de agua e impactando negativamente al ambiente, ya que se utiliza agua de pozo para los lavados de gases para reponer las pérdidas durante el tratamiento. Para mejorar las condiciones de la operación, durante el mantenimiento previo a Z21-22 se realizó reingeniería en el proceso donde destacan la instalación de un cilindro concéntrico o *Center Well* en el clarificador y el aumento de un tramo del filtro rotativo.

Con la finalidad de cuantificar el impacto en la calidad de lodos deshidratados, agua clarificada y el ambiente, se realizó una evaluación técnica a la planta de tratamiento de agua con cenizas posterior a su reingeniería. Asimismo, se realizó una evaluación económica con la finalidad de determinar la viabilidad económica de la reingeniería por medio de indicadores como la relación beneficio-costo, el período de recuperación y valor presente neto.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Evaluar técnica y económicamente la planta de tratamiento de agua con cenizas procedente del área de cogeneración del Ingenio San Antonio.

2.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar los parámetros fisicoquímicos de los afluentes y los efluentes de la planta de tratamiento de agua con cenizas.
- Determinar la dosis óptima de floculante utilizado en la planta de tratamiento de agua con cenizas, por medio de prueba de cilindros.
- Determinar la eficiencia de remoción de sólidos de la planta de tratamiento de agua con cenizas en base a la implementación de balances de masa en el proceso.
- Analizar la relación Beneficio-Costo de las mejoras implementadas en la planta de tratamiento de agua con cenizas.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Calderas

Las calderas son equipos de transferencia de calor que se encargan de convertir agua en vapor, logrando esto por medio de la absorción de calor generado por la combustión de algún combustible o por medios eléctricos (Universidad Pedagógica Nacional, 2021). El vapor generado es utilizado como medio energético, ya sea para proporcionar calor en alguna etapa de un proceso, o para la generación de energía eléctrica por medio de turbinas o turbogeneradores. Cuando el vapor generado está saturado y pierde su calor latente, este se condensa y se obtiene agua con una cantidad de energía y pureza considerablemente alta. Esta agua puede retornar como alimentación a las calderas, generando ahorros económicos y energéticos (Spirax Sarco, 2011).

3.1.1. Calderas pirotubulares

Conocidas también como calderas de coraza o empaquetas, las calderas pirotubulares se caracterizan por contener todas sus superficies de transferencia de calor en una coraza de acero. El diseño de este equipo permite transportar los gases de combustión por medio de tubos a lo largo del hogar, donde se encuentra con el agua con la que se genera vapor (Spirax Sarco, 2011). Estas calderas son las más utilizadas debido a su versatilidad de combustibles y su bajo costo debido a sus diseños pequeños.

En estas calderas, los gases de combustión generados en el quemador pueden transportarse en varios tubos y “pasos” (disposición similar a serpentines) con el objetivo de distribuir el calor de forma uniforme a lo largo de la caldera permitiendo que el agua dentro de ella genere mayor cantidad de vapor con calidad adecuada.

3.1.2. Calderas acuotubulares

Las calderas acuotubulares transportan el agua dentro de los tubos, y los gases de combustión son los que se encuentran en el hogar. Debido a su disposición, la transferencia de calor se da por convección y radiación a las tuberías. El combustible usual para estos sistemas es la biomasa. El diseño de estas calderas permite el aprovechamiento integral de la energía residual en el agua dentro de los tubos, evitando que ésta deba drenarse al ponerse en marcha el sistema. La transferencia de calor es más efectiva debido a que el agua se encuentra distribuida en varios tubos, permitiendo tener mejor distribución de superficie de transferencia de calor, produciendo vapor a mayor temperatura y presión

comparado al que producen las calderas pirotubulares, mejorando la eficiencia de generación, y presentando mayor seguridad para las industrias que trabajan con equipos que requieran altas presiones (Spirax Sarco, 2011).

Este tipo de calderas posee gran contenido de agua por unidad de masa de vapor, por lo que la calidad del agua de alimentación suele ser superior al requerido para otro tipo de calderas (Miranda, 2018). Las industrias que aprovechan estos generadores de vapor suelen ser las plantas de energía, o industrias que cuenten con plantas de cogeneración, como es el caso de los ingenios azucareros.

3.2. Combustible

El combustible es el compuesto que se oxida durante la combustión, por lo que este es el que desprende calor dada la reacción. Para la alimentación de calderas se pueden utilizar diferentes fuentes de combustible, las cuales se detallarán en los próximos apartados.

3.2.1. Gas

El gas se utiliza como combustible para calderas ya que, con un pequeño exceso de aire, es fácil su quema. Se presenta en dos tipos, gas natural, y gases de petróleo licuados; el primero es usado en su estado natural y contiene alta concentración de metano, mientras que el gas licuado es producido del refinamiento de petróleo, presentándose como propano y butano, y es almacenado bajo presión hasta el momento de su uso (Spirax Sarco, 2011).

3.2.2. Aceite

El aceite utilizado para las calderas proviene del residuo generado por la destilación de crudo de petróleo, luego de la producción de aceites ligeros como gasolina, parafina, y diferentes líneas de combustibles. Aproximadamente 15 kg de vapor pueden ser producidos por cada kilogramo de aceite, o 14 kg de vapor por cada litro de aceite (Spirax Sarco, 2011).

3.2.3. Biomasa

La biomasa es materia sólida orgánica que funciona como combustible para la generación de vapor en las calderas. Su composición depende del material, pero siempre contienen carbono e hidrógeno, siendo éstos los componentes que

permiten la combustión. Algunas de las biomásas más utilizadas son la madera, el eucalipto, bambú, bagazo, entre otros (Spirax Sarco, 2011).

Dentro de los diferentes tipos de biomasa, el bagazo (subproducto del proceso de extracción de jugo de la caña de azúcar) es el combustible orgánico más utilizado en las calderas. El poder calorífico bruto típico del bagazo, en condiciones secas y libres de impurezas, es de aproximadamente 8 000 BTU/lb (Coloch, 2017).

La composición del bagazo puede evaluarse tanto por análisis últimos (composición elemental o química de la materia), como análisis próximos (composición física). Los detalles se especifican en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Composición química y física típica del bagazo

| Análisis últimos | | Análisis próximos | |
|------------------|-------|-------------------|-------|
| Elemento | % | Constituyentes | % |
| Hidrogeno | 5 | Humedad | 46.42 |
| Carbono | 46.73 | Carbón fijo | 4.16 |
| Nitrógeno | 0.34 | Volátiles | 47.27 |
| Oxígeno | 42.43 | Cenizas | 2.15 |
| Sulfuro | 5.5 | | |

Nota: Adaptado de *Estudio del impacto ambiental del uso del bagazo como fuente de energía en centrales azucareros en Cuba. Estudio caso "Melanio Hernández"* por Gil Unday, 2005.

3.3. Parámetros de calidad de agua de lavado

El agua que se utiliza para el lavado de los equipos es uno de los aspectos más importantes ya que determina su funcionamiento, mantenimiento, y tiempo de vida. Entre los efectos generados por las impurezas del agua destacan las incrustaciones sobre las superficies de los materiales con los que entra en contacto, además de corrosión debido a los ácidos contenidos en ella. El agua clarificada también combate el fenómeno de arrastre que se da cuando los gases de combustión que se descargan a la chimenea transportan materia contaminante; mientras mayor sea la calidad del agua, mejor es el lavado de gases (Sincal, 2018).

3.3.1. Sólidos suspendidos totales y sólidos totales disueltos

Los Sólidos Suspendidos Totales (SST) deben su origen principalmente a la materia orgánica, y usualmente son todos aquellos que son fácilmente removibles por medios físicos o mecánicos, como procesos de filtración o sedimentación. Por otro lado, los Sólidos Totales Disueltos (STD) se componen por materia orgánica e inorgánica, se consideran como sólidos no sedimentables, y para ser removidos se necesitan emplear tanto métodos físicos como químicos (Hernandez, 2007). En el agua de lavado, los STD son un indicador de salinidad, pues expresan la concentración total de sales disueltas en agua, como sales de calcio y cloruros de sulfato, y entre sus efectos está la formación de depósitos (Sincal, 2018). Para el agua de calderas acuatubulares de alta presión, el contenido máximo de STD puede ser de 1 000 ppm (Spirax Sarco, 2011).

3.3.2. pH

El potencial de hidrogeno (pH) representa el nivel de acidez o alcalinidad del agua, la cual, para las calderas, al igual que sus ceniceros y *scrubbers*, debe mantener un valor lejos de los rangos ácidos para evitar la corrosión; no obstante, su valor no debe sobrepasar el pH=12 para evitar la generación de depósitos; los valores recomendados de pH oscilan entre 8.7 a 9.2 (Oelker, 2007). El aumento del pH del agua con concentraciones de calcio y magnesio sobre los límites permitidos induce la precipitación de sales responsables de formar la dureza.

3.3.3. Dureza

La dureza cuantifica la cantidad de iones de calcio y magnesio presentes, y la importancia de remoción radica en la formación de depósitos e incrustaciones sobre las superficies de los equipos. Las concentraciones de durezas se miden en ppm de carbonato de calcio (CaCO_3). Generalmente, el valor requerido en el agua de alimentación a la caldera para evitar daños debe ser menor a 2 ppm CaCO_3 (Oelker, 2007).

3.3.4. Alcalinidad

Niveles de alcalinidad descontrolados del agua de alimentación influyen directamente con la formación de depósitos, puesto que es el conglomerado de los carbonatos, bicarbonatos, hidróxidos, silicatos o fosfatos existentes en el agua.

La alcalinidad generalmente no debe pasar de los 25 ppm en el agua de alimentación para no perjudicar los equipos (Oelker, 2007).

3.3.5. Temperatura

La temperatura del agua de lavado influye directamente en la solubilidad de los bicarbonatos disueltos, provenientes de la propia dureza del agua, presentando una relación inversa entre ambos factores; a mayor temperatura, los depósitos son menos solubles, y viceversa. Este fenómeno se debe a la influencia de la temperatura en la concentración de las especies que contiene el agua, modificando, según su valor, las constantes de equilibrio (Caraballo, 2009).

3.3.6. Índice de incrustación

El punto de saturación de equilibrio del agua para el carbonato de calcio y otras sales está descrito por varios índices que proveen información de la formación de incrustaciones o potencial corrosivo del agua, al encontrarse sobresaturada o subsaturada, respectivamente. Entre los índices que se determinan está el de Langelier, el potencial de precipitación, Ryznar, agresividad, y Larson (Department of Water Affairs and Forestry, 1996).

A pesar de que el índice de Langelier (LSI) y el potencial de precipitación (PPCC) se basan en la saturación del carbonato de calcio para indicar si el agua es estable, corrosiva, o formará depósitos, en ocasiones el agua que cumple con los valores límites, es decir, dureza demasiado alta o baja, pueden tener el mismo valor de LSI, dando resultados siempre corrosivos.

Por otro lado, el índice de Ryznar (IRz) representa un índice empírico para determinar el carácter corrosivo o incrustante de las aguas, incluyendo la influencia de la dureza (Mora y Garcia, 2013). El IRz toma como base los mismos parámetros que Langelier, pero siempre da un valor positivo, el cual provee una idea del nivel corrosivo o incrustante del agua; entre los factores que toma en cuenta el IRz está la temperatura, pH, sólidos totales disueltos, dureza, y alcalinidad (Trujillo, Martínez, y Nadia, 2008).

Los rangos del índice de Ryznar que determinan el nivel de incrustabilidad o corrosividad están dados por la tabla 3.2:

Tabla 3.2 Características del agua dado el índice de Ryznar

| Índice de Ryznar (IRz) | |
|-------------------------------|-------------------------|
| 4.0-5.0 | Muy incrustante |
| 5.0-6.0 | Débilmente incrustante |
| 6.0-7.0 | En Equilibrio |
| 7.0-7.5 | Corrosiva |
| 7.5-9.0 | Fuertemente corrosiva |
| >9.0 | Excesivamente corrosiva |

Nota: Adaptado de *A New Index for Determining Amount of Calcium Carbonate Scale Formed by a Water* (p.472-483) por J.W Ryznar, 1994, *American Water Works Association [AWWA]*, 36(4).

3.4. Balance de materiales

El balance de masa se refiere a la secuencia de cálculos que permite llevar la cuenta de todas las sustancias que intervienen en un proceso de transformación, rigiéndose por la ley de conservación de la masa; son la base fundamental para el diseño de procesos debido a que así se determina tanto las cantidades de materia prima requeridas como productos procesados u obtenidos en cada una de las etapas de los procesos.

El balance de materiales puede ser totalmente físico, conocido como balance de materiales; también puede involucrar reacciones químicas y balances de energía. Para realizar los balances de materiales, es necesario recolectar información de las características físicas y químicas de las corrientes que entran y salen del proceso, como también las condiciones de operación y volumétricas de cada uno de los flujos (Cedeño, 2018).

3.5. Filtración

La filtración es el proceso de separación de partículas sólidas de un fluido. Generalmente, una corriente líquida se hace pasar a través de un medio filtrante, sobre el que se depositan los sólidos. Al atravesar las membranas filtrantes, las partículas de mayor tamaño a los orificios de la membrana quedan retenidas en

ellas, entregando una corriente líquida con menor cantidad de sólidos (Martin y Salcedo, 2011).

Los filtros pueden operar de forma continua o discontinua, siendo uno de sus criterios de selección la velocidad de filtración de los sólidos. En el caso de los filtros continuos, la formación de sólidos es mayor a 5 L/min, la cual se considera una velocidad de filtración rápida; los filtros de tambor giratorio y filtros de discos rotativos destacan en esta clasificación (Martin y Salcedo, 2011).

3.5.1. Factores que influyen en la filtración

La eficiencia de remoción de partículas de una corriente está relacionada con distintas características de suspensión, como la naturaleza de partícula, tamaño y densidad de partícula, resistencia o dureza de los flóculos, concentración de partículas en el afluente, entre otras (Cristobal, 2005).

La densidad de partículas define el contacto entre la partícula suspendida y el medio filtrante; asimismo, indica el tipo de coagulante que se utilizará para ajustar el tamaño de partícula suspendida, con el fin de obtener una mayor eficiencia de filtración.

Una vez que se está en presencia de flóculos, la dureza es un factor que debe tomarse a consideración ya que los flóculos débiles tienden a fragmentarse y penetrar fácilmente en el medio filtrante, promoviendo la turbidez del efluente (Cristobal, 2005).

3.5.2. Filtro rotativo

Los filtros rotativos son unidades de pretratamiento para la eliminación de residuos sólidos-líquidos a través de un tambor filtrante formado por mallas de rejilla, o perforadas de diferente calibre según el tipo y concentración de sólido. Estos filtros tienen un rango de filtración de partículas de diámetros entre 0.15 mm a 5 mm, y trabajan de forma continua (Toro, 2016).

Entre los filtros rotativos se destaca el filtro de tambor rotativo fino y grueso. El caudal de alimentación es distribuido en el perímetro interno del filtro, por toda la superficie del tambor, el cuál gira entre 3 a 8 RPM, con la finalidad de retener y arrastrar las impurezas que se encuentran en el agua.

Estos equipos son construidos con acero inoxidable, lo que evita su corrosión; además, cuenta con placas de filtración que pueden reemplazarse con relativa facilidad debido a un sistema de fijación exclusivo. El agua filtrada se recolecta por la parte baja del filtro por medio de cajas recolectoras; asimismo, los lodos húmedos pueden recolectarse en cajas similares o transportarse por medio de un sistema de tornillo sin fin incluido en este equipo (Grupo DLC, 2015).

3.5.3. Filtro estático

Los filtros estáticos se utilizan principalmente para tamizar laminarmente. El fluido se lleva al tamiz por bombeo o a presión, y luego de cierto tiempo de retención, se produce un desbordamiento laminar en el que el vertido se desliza por la malla filtrante, permitiendo que el flujo escurra a través de la malla con respecto a su tamaño y que los sólidos retenidos caigan por gravedad hasta un contenedor ubicado en la parte inferior; el líquido filtrado cae en el depósito inferior, siendo evacuado por gravedad mediante tuberías (Toro, 2009; Grupo DLC, 2015).

3.6. Floculación

En este proceso los *flocs* (partículas aglomeradas generalmente por acción de coagulantes) son aglomerados en una nube electrónica debido a la acción de floculante, aumentando así el peso de dichas partículas, permitiendo un asentamiento a mayor velocidad debido a la acción de la fuerza de la gravedad; simultáneamente, se propicia la deshidratación de los lodos a mayor rapidez.

El proceso consiste en añadir floculante al agua con el objetivo de aglutinar la materia coloidal no sedimentable en pocos grupos de gran tamaño de partícula, llamados flóculos. La adición del floculante se realiza a condiciones de mezclado lento, debido a que los flóculos pueden romperse fácilmente debido a su fragilidad y su baja fuerza de atracción (Cabrera et al., 2009).

3.6.1. Tipos de floculante

Según Andia (2000), los floculantes se pueden clasificar de acuerdo con su origen, encontrando entre ellos los floculantes orgánicos, los cuales son polímeros naturales extraídos de sustancias animales o vegetales; y los floculantes sintéticos, los cuales se obtienen por asociación de monómeros con masa molecular elevada, subdividiéndose en aniónicos, neutros, catiónicos.

Para evaluar qué producto químico es más adecuado y su dosificación aproximada requerida para una clarificación exitosa, se tienen dos tipos de pruebas de laboratorios: las pruebas de jarra y las pruebas de cilindro.

3.6.2. Pruebas de jarra

Las pruebas de jarra se enfocan en imitar las condiciones de mezclado, asentamiento y dosificaciones químicas de coagulantes y floculantes en las que

operan las plantas clarificadoras de agua con corrientes a tratar de aproximadamente 5 000 mg/L de SST. Estas pruebas se realizan en un equipo que puede tener desde tres hasta seis propelas con motores individuales, las cuáles se introducen en beakers (jarras) con una muestra del agua a tratar, generalmente de 500 ml. La clarificación de agua clara, asentamiento de sólidos biológicos y corrientes de desperdicios primarios entran en la categoría de pruebas de jarras (Kemmer, 1988).

Estas pruebas inician típicamente con una alta energía de mezclado, debido a que el coagulante debe de mezclarse y colisionar con los contaminantes con el fin de que los sólidos neutralizados inicien a aglomerarse para asentarse posteriormente.

Si se requiere un floculante puede adicionarse en los últimos segundos del mezclado rápido, en seguida se disminuye la energía de mezclado para observar el comportamiento de los sólidos aglomerados, ya sea si éstos se rompen o se aglomeran por la energía de mezclado o si tardan mucho tiempo en asentarse. Si se hacen pruebas simultáneas con dosificaciones o químicos distintos, pueden compararse entre ellas para determina las condiciones más adecuadas.

3.6.3. Pruebas de cilindros

Las pruebas de cilindros se utilizan para corrientes de agua con más de 5 000 mg/L de SST en agua, los procesos de minería y los lodos producto de una clarificación primaria son las que se abarcan en esta prueba. Estas pruebas se realizan para evaluar la velocidad de sedimentación de los sólidos; debido a la cantidad de los sólidos presentes no es requerida mucha energía de mezclado, ya que las colisiones son más propensas a ocurrir (Kemmer, 1988).

Con una muestra de 500 ml o 1 L, las pruebas de cilindros se llevan a cabo dosificando el coagulante y/o floculante. Posteriormente, se invierte el cilindro hasta que la mezcla se homogenice, se coloca boca arriba y se observa la separación de la interfaz de agua con la del sólido asentándose. Se toman datos de nivel y de tiempo constantes, para luego graficar y analizar el comportamiento.

Tanto las pruebas de jarra como las pruebas de cilindros tienen como objetivo determinar las condiciones y dosificaciones en las que los sólidos se asienten con mayor velocidad y el agua se encuentre más limpia. Los distintos experimentos que se hagan con sus respectivas pruebas se comparan y se seleccionan las condiciones que otorguen una clarificación más efectiva.

3.7. Clarificación

El proceso de clarificación permite la separación líquido-sólido por medio de neutralización de los sólidos presentes, promoviendo la sedimentación de los sólidos que presenten mayor densidad que el líquido del que se pretenden separar. El constituyente líquido se separa por medio de decantación (Rein, 2017).

La clarificación es un proceso que ocurre sin necesidad de tratamientos previos; sin embargo, a nivel industrial no es viable separar sólidos solo con este método, debido a que el tiempo de sedimentación es muy alto, y, en muchos casos, no propicia el asentamiento completo de los sólidos.

La eficiencia de este proceso depende del tipo y dosis de coagulante, del uso de polímeros, de la calidad del afluente, del tamaño y profundidad del clarificador, y, principalmente, de la carga superficial. Este último parámetro, también conocido como tasa de sedimentación, representa la velocidad crítica de sedimentación de las partículas; cualquier partícula con velocidad igual o mayor a la crítica será automáticamente removida.

3.7.1. Carga superficial

En el proceso de clarificación, la carga superficial expresa la velocidad de sedimentación teórica a partir de la cual los sólidos dentro del líquido son removidos del equipo (Pérez Farrás, 2005). Siguiendo la ley de Stokes, si la magnitud de la carga superficial equivale a la magnitud de los vectores de fuerza gravitacional y de flotación, proporcionando el equilibrio de fuerzas, las partículas no sedimentarían. En este caso es necesario la aplicación de tratamientos químicos con el fin de aumentar el tamaño de partícula y propiciar la sedimentación.

La carga superficial es utilizada como indicativo de la velocidad de sedimentación teórica que debe igualarse o vencerse para llevar a cabo la sedimentación de sólidos. Las distintas industrias establecen el límite mínimo al que requieren vencer a este parámetro con el fin de llevar a cabo el proceso.

En el diseño de clarificadores se debe tomar en cuenta que la eficiencia de remoción decrece a medida que aumenta la carga superficial (Maltodano, 2004).

3.7.2. Lodos concentrados

La aglomeración de los sólidos sedimentados en la zona inferior de las unidades, son conocidos como "tortas de lodos" o "lodos concentrados". El lodo generado posee, generalmente, una humedad del 98%, lo que simboliza un problema para

las industrias debido a que implica grandes pérdidas de agua y, por ende, mayores gastos en el transporte de lodos hacia su disposición final (Martinez, 2008).

Por estos motivos, muchas plantas cuentan con sistemas de pretratamiento de lodos, donde se extrae gran parte del agua retenida mediante procesos de deshidratación, donde generalmente existe una etapa de aglomeración de lodos mediante floculación, seguida de una etapa de centrifugación, logrando reducir los lodos hasta un 80% de humedad (Martinez, 2008).

El volumen de lodos obtenidos depende de la cantidad de sólidos eliminados de la corriente de entrada y del contenido de agua en los lodos, es decir, la humedad; a menor humedad se obtendrán lodos más compactos, y viceversa. Conocer el contenido de sólidos en cada corriente es de gran aporte cuando se establecen balances de materia a las unidades (Lopez y Vega, 2018).

Para evaluar las características de decantación de los procesos de separación, existe el índice volumétrico del lodo, que se refiere al volumen que ocupa un gramo de sólido en suspensión en peso seco; este índice se utiliza para determinar la variación del volumen de lodos respecto al tiempo (Morales, 2014).

3.8. Cogeneración

El término cogeneración se refiere a la generación simultánea de energía eléctrica y energía térmica, ya sea en forma de vapor o agua caliente, con una eficiencia superior a la asociada a su producción en forma independiente; por separado, la eficiencia térmica de un generador de energía eléctrica es aproximadamente de 35% y el de caldera de un 90%, dando una eficiencia global del 55%, en cambio, el sistema de cogeneración tiene una eficiencia global de un 85% (Oelker, 2007).

Los sistemas de cogeneración usan, en su mayoría, como elementos primarios turbinas de vapor, turbinas de gas, y máquinas de combustión interna. La retribución de electricidad varía en función del combustible ocupado, el cual puede asociar su origen al sector agrícola y forestal, ya sea utilizando las cosechas directamente como fuente de energía, o utilizando los residuos que se generan por los procesos productivos, como es el caso del bagazo en la elaboración de azúcar; otros residuos que pueden utilizarse provienen del arroz, algodón, o girasol (IDAE, 2007).

Debido a la procedencia, el combustible para la cogeneración de energía suele estar acompañada por elementos no quemables, conocidos como impurezas, que pueden presentarse en forma de tierra, rocas, arena, entre otros; esta circunstancia no solo disminuye el poder calorífico del combustible, sino que contribuye a la formación de cenizas en la caldera (Coloch, 2017).

3.9. Descripción del proceso de cogeneración

El Ingenio San Antonio cuenta con una planta de cogeneración de energía con la que abastecen todas las necesidades térmicas y eléctricas de la compañía; a su vez, entrega energía eléctrica a ENATREL, organismo intermediario encargado de regular la cantidad de energía distribuida a DISNORTE-DISSUR. Asimismo, el área de cogeneración se encarga del manejo global del bagazo producido. La descripción detallada en este apartado fue explicada por personal del área de cogeneración mediante múltiples entrevistas en el período del 1 al 10 de diciembre de 2021.

3.9.1. Producción de vapor

El Ingenio San Antonio utiliza tres calderas acuotubulares de alta presión para la producción de vapor. Actualmente, cada equipo cuenta con una capacidad de generación nominal de 135 ton/h de vapor sobrecalentado a 750 psi y 435 °C, temperatura que logra alcanzarse debido a que cada caldera cuenta con un sobrecalentador en la línea de salida de vapor. El código utilizado para las calderas es HPB, siendo las calderas presentes la HPB1, HPB2 y HPB3.

Las líneas de vapor de cada caldera se conectan de forma similar a la mostrada en la figura 3.1. El vapor entregado en conjunto por el sistema de calderas (vapor principal) debe tener una presión de 600 psi para el correcto funcionamiento de los turbogeneradores.

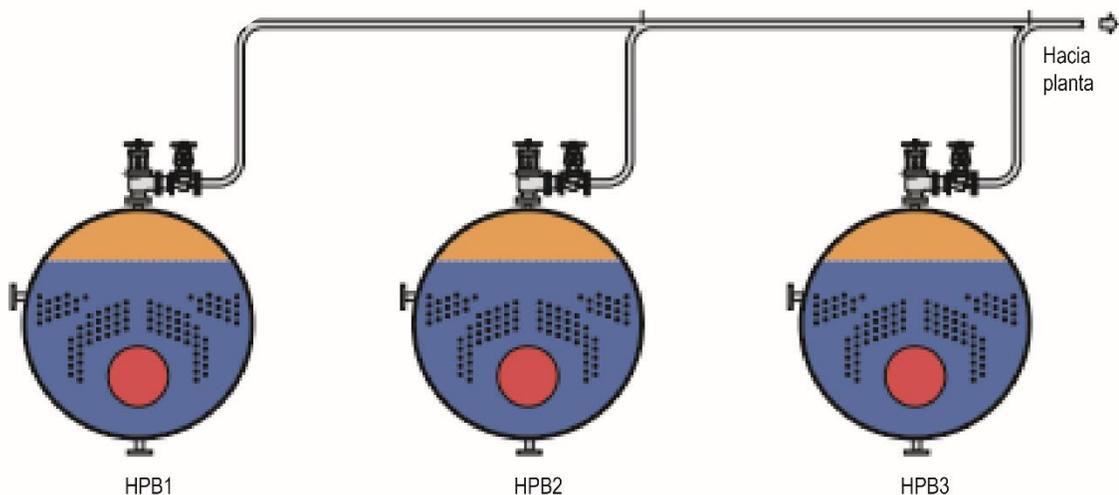


Figura 3.1 Distribución de vapor principal generado por el ingenio San Antonio

Nota: Adaptado de The Steam and Condensate Loop (El ciclo de vapor y condensado), Spirax Sarco, 2011.

Debido al diseño del cabezal de distribución de vapor, cada caldera debe entregar vapor con una presión mayor a 600 psi, para evitar sobrecargas y cumplir con la presión requerida por los turbogeneradores. Así, 720 psi es la presión de vapor estándar para HPB1, 650 psi para HPB2 y 635 psi para HPB3.

3.9.2. Manejo de bagazo

El combustible utilizado para generar gases de combustión en período de zafra es parte del bagazo residual separado por molinos secadores (MS) en el proceso de extracción de jugo de caña. Durante el período de generación, se utiliza eucalipto como combustible.

Para alimentar el combustible a las calderas, se utilizan bandas transportadoras que dirigen el bagazo a sistemas de tolvas alimentadoras eléctricas. Las calderas HPB2 y HPB3 cuentan con seis tolvas alimentadoras con velocidad nominal de 18 RPM cada una, mientras que la caldera HPB1 cuenta con siete tolvas alimentadoras con velocidad nominal de 20 RPM cada una. El bagazo debe alimentarse a humedad no mayor de 50%; nominalmente, se necesitan 55.81 ton/h de bagazo por caldera para producir 135 ton/h de vapor.

Para la quema de combustible se utiliza aire, el cual es entregado al sistema por medio de un ventilador de tiro forzado integrado en las HPB. El aire es calentado por medio de precalentadores con el objetivo de llevar a cabo una combustión adecuada.

En la mayoría de los casos, la cantidad de bagazo alimentado es menor que la cantidad producida, por lo que el bagazo sobrante se transporta por bandas hacia zonas de recolección. En estas zonas, se utilizan palas recolectoras para transportar parte del bagazo a empacadoras; cierta cantidad del bagazo empacado se vende mientras que la otra parte se almacena. Si aún sobra bagazo no empacado, este se dirige a patios donde se almacena a granel.

3.9.3. Alimentación de agua

Para el arranque de las calderas, el agua de alimentación utilizada es agua de pozo previamente tratada ya sea por una planta de desmineralización, la cual consta de tres columnas con resinas de intercambio iónico: una resina catiónica débil (WAC, H^+ es el ión de intercambio), una resina catiónica fuerte (SAC, Na^+ es el ión de intercambio) y una resina aniónica (HBA, OH^- es el ión de intercambio), o por una planta de ósmosis inversa.

Cuando las calderas culminan su arranque y el ciclo de cogeneración se encuentra estable, se utiliza retorno de condensado de los procesos de fabricación y destilería para alimentar a las calderas; este se llama condensado de primer

orden, el cual se almacena en un tanque homónimo. La conductividad eléctrica del condensado debe ser menor a $10 \mu\text{S}/\text{cm}$.

Para reponer agua, se utiliza retorno de condensado de fabricación con una conductividad eléctrica máxima de $20 \mu\text{S}/\text{cm}$; este se llama condensado de segundo orden o condensado vegetal; suele almacenarse en un tanque llamado “tanque de segundo orden”. Como reposición suele utilizarse en menor medida el agua de pozo tratada por intercambio iónico u ósmosis inversa.

En cualquier caso, el agua que se alimenta a las calderas pasa por un desaireador para eliminar gases que puedan corroer equipos y tuberías; luego pasa por un sistema de economizadores con la capacidad de elevar la temperatura del agua nominalmente hasta $118 \text{ }^\circ\text{C}$. El agua de alimentación para HPB1 pasa por un desaireador grande (DG) y luego por un sistema de dos economizadores en serie dentro de la caldera, mismo caso que HPB2. El agua de alimentación de HPB3 pasa por un desaireador pequeño (DP); posteriormente, pasa por un sistema de calentamiento dentro de la caldera, que consta de tres economizadores en serie y un calentador de subenfriamiento.

3.9.4. Generación de energía eléctrica

El proceso de cogeneración del ingenio se muestra en la figura 3.2, este cuenta con un sistema de cuatro turbogeneradores (TG) con una capacidad de generación nominal de 79.3 MWh. Los TG son alimentados con el vapor de 600 psi generado por las calderas HPB, el cual es atemperado previo a su entrada al sistema de generación de energía eléctrica.

El TG1 tiene una capacidad de generación nominal de 19.3 MWh. Se conoce como TG de condensación debido a que cuenta con un condensador de vapor a la salida del sistema. Este vapor condensado pasa por intercambiadores de calor para aumentar su temperatura; posteriormente, este condensado se transporta al tanque “desmineralizado” (TK-DM), del cual parte de su contenido es utilizado para procesos de atemperación de vapor a la entrada de destilería y fábrica.

Los TG2, TG3 y TG4 se conocen como TG a contrapresión, cada uno cuenta con una capacidad nominal de generación de 20 MWh. El vapor que sale de cada TG a 20 psi se colecta en un manifold, donde se distribuye a distintos procesos de fabricación y destilería, tales como calentamiento de jugos. Luego de que este vapor pasa por los distintos procesos, es retornado como condensado.

En dependencia de su conductividad eléctrica, el condensado se almacena en el tanque de primer orden o en el de segundo orden. Si la conductividad eléctrica del condensado supera la máxima admisible por el tanque de segundo orden, este se almacena en un tanque llamado “tanque de tercer orden”. Su uso no es dirigido a las calderas, sino a procesos de limpieza del área de fábrica.

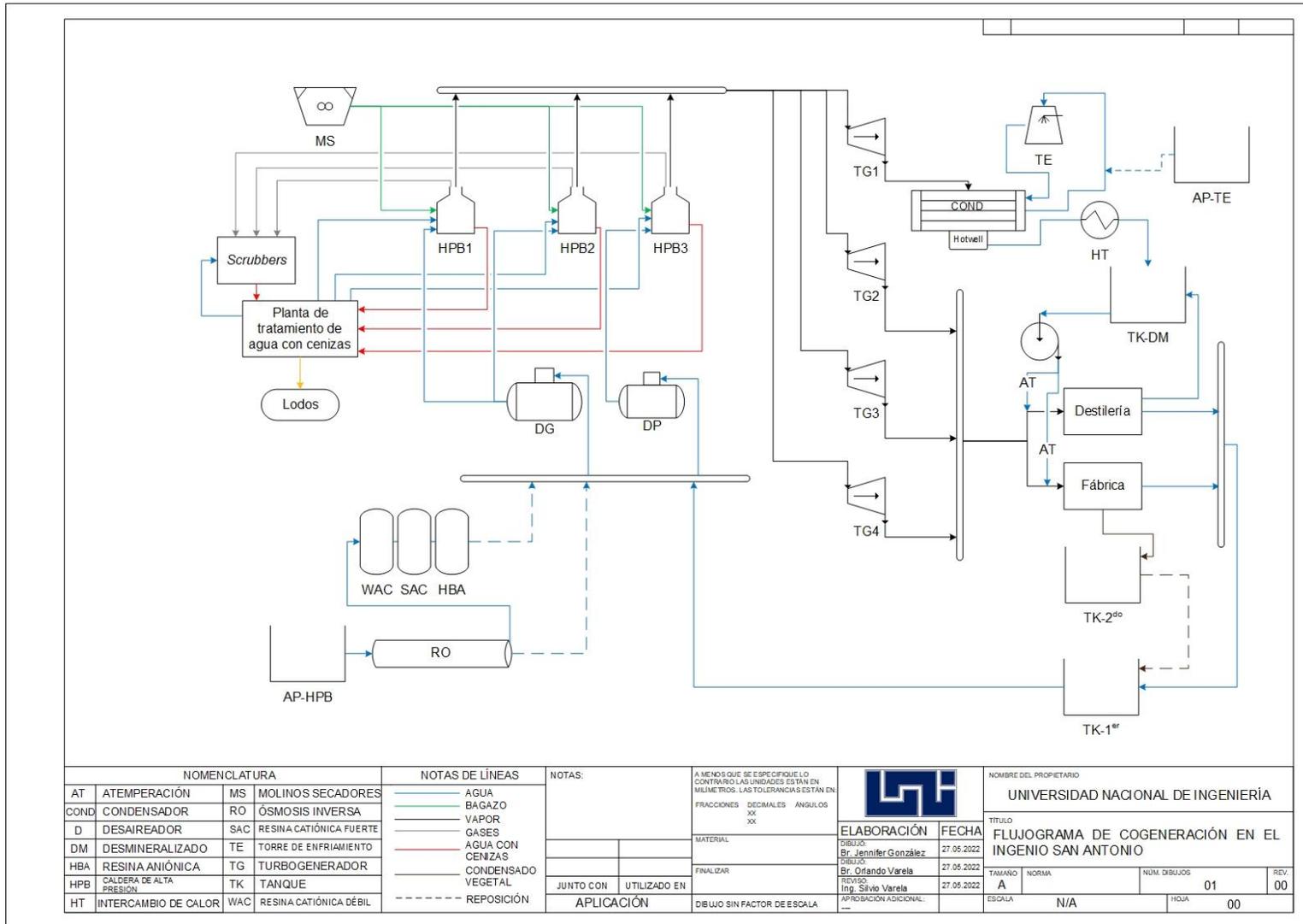


Figura 3.2 Flujoograma del proceso de cogeneración. Elaboración propia.

3.10. Sistemas de lavado de gases

Durante la generación de vapor, la combustión del bagazo puede generar sustancias peligrosas para el ambiente y los organismos; entre éstas destacan los óxidos sulfurosos y nitrosos, material no quemable y ceniza, los cuales son arrastrados por los gases de combustión que salen por las chimeneas de las calderas hasta el ambiente.

Estos gases deben cumplir con ciertas normativas ambientales, con el propósito de evitar la contaminación del aire y proporcionar salud y seguridad a los colaboradores y a la comunidad. Para lograr una limpieza eficiente de los gases, se implementan sistemas lavadores de gases, también conocidos como depuradores de gases o *scrubbers* (Bhargava, 2016).

3.10.1. Scrubbers

Según (Bhargava, 2016), los *scrubbers* son equipos que operan al poner en contacto el flujo de gas de combustión con líquido depurador, usualmente agua, provocando la transferencia de partículas de un medio al otro. Las gotas de agua arrastran las partículas contaminantes del gas generando una corriente de agua de purga, mientras que el gas tratado es descargado a través de una chimenea de escape.

El diseño depende de diversas variables como naturaleza, tamaño y concentración de las partículas, la eficiencia de remoción deseada, además de la temperatura de flujo de entrada de gases. Dentro de la clasificación de los *scrubbers* se encuentran los *scrubbers* de rocío, donde se remueven principalmente las partículas más gruesas al igual que los contaminantes gaseosos.

El gas es introducido por el inferior de la cámara de lavado y el agua es rociada a contracorriente a través de una serie de boquillas ubicada en la parte superior de la cámara. En la industria también se puede encontrar depuradores ciclónicos, de Venturi, o de spray autoinducido (Bhargava, 2016).

3.11. Tolvas recolectoras de cenizas

Debido a la composición del bagazo, durante su combustión este puede generar residuos tales como cenizas, hollín, compuestos no quemables, ácidos sulfurosos y nitrosos, entre otros (los residuos serán llamados “cenizas” indistintamente) (Resano, Guillen, Ubillús, y Barranzuela, 2022).

Parte de estas cenizas son arrastradas hasta chimeneas por medio de ventiladores de tiro inducido, y tratadas por medio de *scrubbers*; sin embargo, otra parte de esta ceniza colisiona con los equipos de recuperación de calor de la caldera (tales como economizadores, bancos convectivos, sobrecalentadores y precalentadores de aire), ocasionando que éstas se adhieran a las superficies de transferencia de calor de estos equipos.

Para evitar aislamiento térmico, las cenizas adheridas se remueven a través de sopladores de vapor en puntos clave de los equipos. La ceniza soplada cae en tolvas recolectoras, las cuales utilizan agua para limpiarse y evitar acumulaciones de cenizas.

El agua que sale de los *scrubbers* y de los sistemas de recolección de cenizas se trata por medio de una planta de tratamiento, con el objetivo de reutilizarla para lavados posteriores, como se menciona en los próximos acápite.

3.12. Descripción del proceso de tratamiento de agua con cenizas

El proceso del tratamiento de agua con cenizas proveniente de los *scrubbers* y tolvas del Ingenio San Antonio que se detalla en este apartado fue explicado por el Ingeniero Silvio José Varela, coordinador de agua de calderas, mediante entrevista realizada el 30 de diciembre 2021.

3.12.1. Lavado de gases y tolvas

Las cenizas volantes son arrastradas por los gases de combustión que salen por la chimenea o se adhieren en distintas superficies de las calderas (Li y Hui, 2016). Para remover estas cenizas, cada caldera cuenta con un *scrubber* para lavar los gases; la HPB1 y HPB2 cuentan con 3 tolvas de recolección de cenizas cada una, mientras que la HPB3 cuenta con 5 tolvas de recolección, como se muestra en la figura 3.2.

Cada *scrubber* requiere 240 m³/h de agua para lavar los gases; asimismo, se requieren 20 m³/h de agua para lavar una tolva, requiriéndose en total 220 m³/h de agua para todo el sistema de tolvas; finalmente, para el lavado de las tres calderas se requieren 940 m³/h de agua. El sistema recibe agua proveniente de una planta de tratamiento de agua con cenizas ubicada en el ingenio para el lavado de la HPB1 y HPB2, y agua de pozo para el lavado de la HPB3.

El efluente total del lavado se transporta por medio de canales de aproximadamente 4 m de profundidad, convergiendo en un canal de la misma profundidad, ubicado debajo de la planta de tratamiento de agua con cenizas. Este efluente contiene un porcentaje de SST aproximado de 0.8 a 1.2%. La distribución del agua de lavado en el sistema está reflejada en la figura 3.3.

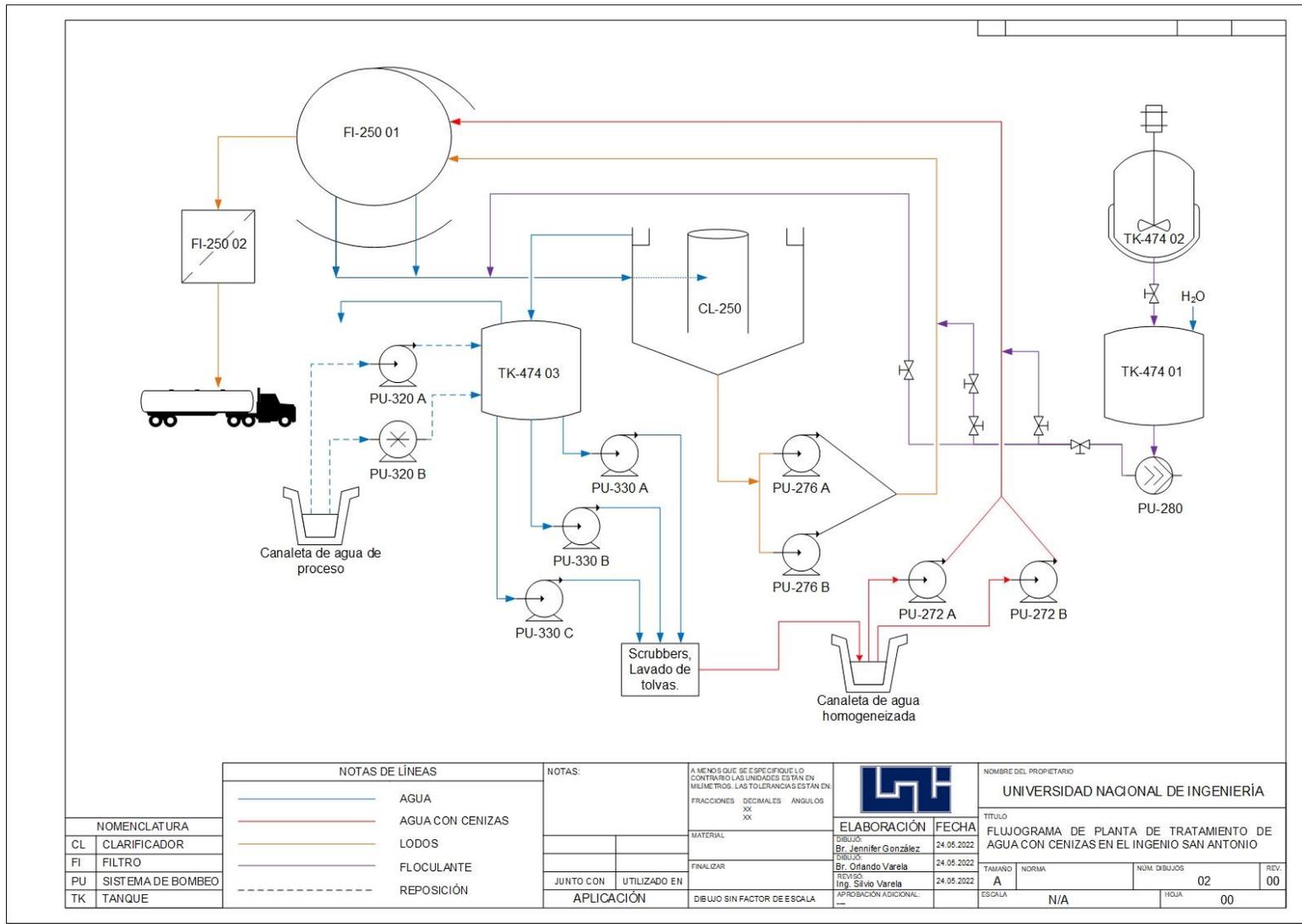


Figura 3.3 Flujoograma de proceso de tratamiento de agua con cenizas. Elaboración propia.

3.12.2. Tratamiento de agua con cenizas

El afluente del proceso corresponde al agua con cenizas proveniente del lavado de las tolvas recolectoras de cenizas y *scrubbers* que se encuentra homogeneizada en los canales debajo de la planta; este es succionado por el sistema de bombeo PU-272. Posteriormente, las tuberías de descarga del sistema PU-272 convergen, transportando el agua al filtro rotativo FI-250 01.

Durante su trayectoria, la corriente es dosificada con floculante N-7128 proveniente del tanque de dosificación TK-473 02 por medio de la bomba de tornillo PU-280, con el objetivo de aglomerar los sólidos suspendidos totales. La corriente entra a la primera etapa del FI-250 01, llamada “etapa gruesa” (0,5 μm), ya que se enfoca en retener sólidos de gran tamaño de partícula; los sólidos gruesos quedan retenidos dentro del filtro, mientras que el agua y sólidos finos son filtrados.

Luego, la corriente filtrada de agua con sólidos finos entra continua y tangencialmente al clarificador CL-250, con el fin de disminuir la energía generada por el movimiento browniano y evitar un régimen turbulento en la corriente. En esta entrada, se cuenta con una conexión de la línea de floculante N-7128, con la finalidad de aumentar la velocidad de sedimentación y compactación de sólidos.

Dentro del sistema, la corriente entrante se separa en una lodos concentrados húmedos formada por sedimentación, y agua que es desplazada por empuje hacia la superficie del clarificador y decantada por rebozo, dirigiéndose hacia el tanque TK-474 03; esta agua se utiliza como agua lavadora de gases y ceniceros.

El tanque TK-474 03 cuenta con dos sistemas de bombeo:

- PU-320: que succionan agua proveniente de múltiples procesos de fabricación; éstas convergen en una canaleta cercana al tanque de recolección y se utilizan como agua de reposición.
- PU-330: sistema de tres bombas que transportan el agua del TK-474 03 a los sistemas de lavado de gases y ceniceros.

Los lodos concentrados, con un porcentaje de SST entre 2% y 4%, es enviada hacia la segunda etapa del FI-250 01 por medio del sistema de bombeo PU-276. Esta etapa es llamada “etapa fina”, cumpliendo una función similar a la de la “etapa gruesa”, reteniendo lodos y recirculando al tanque clarificador agua con mínima cantidad de sólidos finos. En la línea de bombeo hacia el filtro rotativo hay una tercera conexión de la línea de floculante N-7128, actuando como aglomerante de lodos.

A la salida del FI-250 01, los lodos con una humedad en base húmeda proyectada al 80% se transportan a un filtro estático, y luego a un chute, el cual dirige la corriente de lodos hacia camiones (volquetes) de carga. Cuando estos camiones se llenan, transportan el lodo hacia las zonas de siembra de la caña para utilizarse como abono. Una corriente alterna se deriva del filtro estático, siendo esta correspondiente al agua filtrada, la cual retorna al tanque clarificador.

3.12.2.1. Proyecto de reingeniería 2020-2021

Durante el mantenimiento previo a la Z20-21, el ingenio San Antonio llevó a cabo un proyecto de reingeniería, con el objetivo de aumentar el rendimiento y mejorar las condiciones de la planta de tratamiento de agua con cenizas. Con ello, se consiguieron las condiciones para aumentar el caudal de trabajo de la planta de 788 m³/h a 1 020 m³/h, siendo la capacidad nominal de la planta de 1 100 m³/h. Esta capacidad fue lograda gracias a las diferentes modificaciones que se hicieron en cada una de las unidades de la planta, a como se describe a continuación:

Conexiones de efluentes de sistemas de lavado

La planta de tratamiento captaba el agua proveniente de todo el sistema de lavado de la HPB3, el *scrubber* y una de las tres tolvas provenientes de la HPB1, y una tolva del HPB2. Para Z21-22, se realizaron conexiones de los sistemas restantes a las canaletas, con el objetivo de captar la mayor cantidad de agua con cenizas posible.

Filtro rotativo y estático

Durante el período de mantenimiento, se cambió la malla filtrante del filtro rotativo debido a roturas; a su vez, se realizaron modificaciones en el tornillo sin fin, consistiendo en la adición de un tramo 1/16" x 2" a lo largo de la espiral del filtro, con altura aumentada, a la salida del equipo. Así mismo, se modificó el diseño de las canoas con el fin de aumentar la capacidad y evitar derrames de agua.

Por otro lado, la línea de salida del filtro rotativo fue modificada con la instalación del filtro estático FI 250-02, ubicado previo al chute que dirige los lodos hacia los volquetes. A este mismo se le modificó el ángulo de inclinación con el fin de facilitar la caída de los lodos. Posterior a la modificación del ángulo, se logró la instalación de una compuerta de salida del chute.

Clarificador

El modelo anterior trabajaba bajo un flujo turbulento; además, su diseño provocaba que el agua con cenizas rebozara al agua clarificada, generando mayor consumo de floculante por problemas operacionales. En el rediseño, se instaló un cilindro concéntrico de 2.356 m de diámetro, conocido como *Center Well*, donde actualmente se descarga tangencialmente el agua proveniente del FI 250-01, con

el objetivo de dirigir el flujo laminarmente por la parte inferior del *Center Well* hacia el tanque de clarificación.

Sistema de bombeo y de control

Las líneas de descarga y succión del sistema de bombeo PU-276 contaban con el mismo diámetro, lo que causaba cavitación de las bombas. En la reingeniería, se aumentó el diámetro de la línea de succión de 4" a 6", con el fin de proteger mecánicamente las bombas. Así mismo, se realizó un cambio de sellos tanto a las dos bombas que conforman el sistema PU-276.

Adicionalmente, se realizó la instalación de tubería y bomba de la planta de tratamiento de agua hacia el sistema de lavado de la HPB3, con el propósito de no utilizar agua de pozo para el lavado; se proyecta arrancar esta bomba para la zafra 2022-2023, sin embargo, actualmente se utiliza una derivación del sistema de bombeo del lavado de HPB2 a la HPB3. Se llevó a cabo la compra e instalación del panel de control automático de válvulas, y la instalación de un variador de frecuencia al sistema de bombas de agua homogeneizada PU-272.

3.13. Métodos de análisis financieros

El análisis financiero es el conjunto de técnicas utilizadas para diagnosticar la situación y perspectiva económica de la empresa. Cada uno de los métodos toman en cuenta la información de los estados financieros de la empresa, y se evalúan al momento de la toma de decisiones para proyectos de mejora, ya sea en capacitación o reclutamiento de personal, expansión de áreas, creación de nuevas líneas productivas, elegir entre dos alternativas de inversión, y otras (Córdova, Paguay, y Beltrán, 2016).

3.13.1. Flujo Neto de Efectivo

El flujo neto de efectivo (*FNE*) se calcula a través del estado de resultados, y refleja el desempeño económico de la actividad de cualquier empresa productora de bienes o servicios, a través de un periodo de tiempo que suele ser de un año; se habla de un buen desempeño cuando el FNE da resultados positivos, mientras que se habla de pérdidas cuando el resultado es negativo.

En términos generales, el FNE es la diferencia que se da entre los ingresos que tiene la empresa y los costos en que incurre, incluyendo el pago de impuestos y el reparto de utilidades a los trabajadores (Baca Urbina G. , 2007). El FNE, en su

manera más amplia, se calcula utilizando el balance general de estados de resultados de la tabla 3.3:

Tabla 3.3 Cálculo de FNE

| Estado de resultados | |
|-----------------------------|-----------------------------------|
| + | Ingresos totales |
| - | Costos totales |
| = | Utilidad antes de impuestos (UAI) |
| - | Pago de impuestos |
| - | Reparto de utilidades |
| = | Utilidad después de impuestos |
| + | Depreciación y amortización (UDI) |
| = | Flujo neto de efectivo (FNE) |

Nota: Tomado de Fundamentos de Ingeniería Económica (p.194) por G.B Urbina, 2007, McGrawHill Companies.

3.13.2. Depreciación

La depreciación es la reducción del valor de un activo tangible en libros. El método para depreciar un activo es una forma de considerar el valor decreciente del activo para el propietario y para representar el valor económico de disminución del capital invertido en él.

A pesar de que la depreciación no es un flujo de efectivo, da lugar a cambios reales en él ya que es un monto deducible para fines de cálculo de impuestos sobre la renta (Blank y Tarquin, 2012).

Existen diversos métodos para la determinación de la depreciación, sin embargo, el más utilizado es el método de línea recta (LR), el cual consiste en recuperar el valor de un activo en una cantidad que es igual a lo largo de cada uno de los años de vida fiscal, es decir, los años que se consideran en el cálculo del cargo de depreciación.

En este método se considera que cada activo tiene un valor de salvamento al final de la vida útil o periodo de análisis, y se obtiene por la empresa en el momento de vender determinado activo (Baca Urbina G. , 2007). La depreciación en línea recta se calcula utilizando la 3.1:

$$D_t = \frac{P_{equip} - V_{STO}}{n_D} \quad \text{Ec. 3.1}$$

Donde D_t : depreciación (\$/año), V_{STO} : valor de salvamento (\$), n_D : período de depreciación (año), P_{equip} : inversión en materiales.

3.13.3. Tasa Mínima Aceptable de Rendimiento

La Tasa Mínima Aceptable de Rendimiento (TMAR) es una tasa definida por el inversionista, con la cual garantiza el retorno de la inversión inicial más un beneficio por desembolso. Para que esta tasa resulte atractiva, el rendimiento de su beneficio debe superar a la tasa de inflación del país donde se invierte, con el fin de aumentar el poder adquisitivo del inversionista (Baca Urbina G. , 2007).

La TMAR depende del inversionista, el proyecto de inversión y el contexto social y gubernamental. Ésta se define utilizando la ecuación 3.2

$$TMAR = T_{INF} + P_R \quad \text{Ec. 3.2}$$

Donde $TMAR$: Tasa Mínima Aceptable de Rendimiento, T_{INF} : tasa de inflación, P_R : premio al riesgo. La tasa de inflación es un valor pronosticable con precisión variable, pues depende mucho de las condiciones de inversión; el premio al riesgo es la ganancia que el inversionista define que vale la pena invertir su dinero; a mayor riesgo, mayor ganancia (Baca Urbina G. , 2007)

3.13.4. Período de Recuperación

El periodo de recuperación de una inversión es el tiempo estimado, generalmente en años, en que los ingresos estimados, ahorros y otros beneficios económicos recuperen la inversión inicial y una tasa de rendimiento establecida. Es otro uso de la técnica del valor presente, y va de la mano con el análisis del punto de equilibrio. (Blank y Tarquin, 2012).

El periodo de recuperación se puede determinar según el rendimiento requerido, siendo que, si el rendimiento es cero, entonces solo se recupera la inversión inicial, mientras que, si se espera un rendimiento mayor que cero, se obtiene el tiempo de recuperación con un porcentaje de ganancia (Blank y Tarquin, 2012).

A un panorama sin rendimiento, se tienen dos situaciones en el cálculo del periodo de recuperación: con flujo variante anualmente, y con flujo uniforme. La primera forma se calcula utilizando la ecuación 3.3:

$$n = a + \frac{(P - FNE_{Ac_a})}{FNE_n} \quad \text{Ec. 3.3}$$

Donde a : período anterior al que se tiene recuperación de la inversión (año), FNE_{Ac_a} : flujo neto de efectivo acumulado hasta el período a (\$), P : inversión inicial, (\$), FNE_n : flujo neto de efectivo del año en que se recupera la inversión y n es el período de recuperación (año).

En cambio, cuando el FNE es uniforme, la ecuación se resume a la ecuación 3.4:

$$n = \frac{P}{FNE} \quad \text{Ec. 3.4}$$

3.13.5. Valor Presente Neto

El Valor Presente Neto (VPN) es un método de análisis de inversión que representa distintos FNE en distintos períodos de tiempo en el futuro, equivalentes a un valor único en el presente. Este método es muy representativo como criterio de selección de proyectos debido a que considera todos los FNE , incluyendo la inversión inicial (Baca Urbina G. , 2007).

$$VPN = -P + \sum_{t=1}^n \frac{FNE_t}{(1+i)^t} \quad \text{Ec. 3.5}$$

Donde VPN : Valor Presente Neto (\$), i : TMAR (%), P : inversión inicial, t : período (año) y FNE_t : flujo neto de efectivo (\$).

Cabe recalcar que, al convertir valores futuros al presente, la tasa que se utiliza se llama tasa de descuento y los FNE en el presente se llaman flujos descontados. Baca Urbina, 2007, establece los siguientes criterios para tomar una decisión de inversión con VPN:

- Si $VPN \geq 0$, es conveniente aceptar la inversión. La ganancia es igual o mayor al rendimiento solicitado.
- Si $VPN < 0$, se debe rechazar la inversión. La ganancia sería menor a la mínima solicitada.

3.13.6. Relación Beneficio-Costo

El análisis de la relación beneficio-costo (B/C) es el proceso de colocar cifras en los diferentes costos y beneficios de una actividad. La relación B/C de una actividad productiva consiste en evaluar la eficiencia económica de los recursos utilizados y mostrar la cantidad de dinero que retorna por cada unidad monetaria invertida durante el periodo determinado.

Los costos se refieren al valor monetario que desembolsa la empresa para un proyecto de inversión, entre ellos pueden estar los costos por mano de obra y costos de producción, mientras que los beneficios se refieren a las ventajas económicas que experimentará el propietario con la puesta en marcha del proyecto (Santos, 2002; Blank y Tarquin, 2012).

En el análisis B/C los flujos considerados deben ser equivalentes en el tiempo, siendo el valor presente neto el término más utilizado. Para calcular el criterio de selección en el método Beneficio-Costo, se debe analizar el cociente de los beneficios obtenidos de un proyecto de inversión, entre los costos que se generan con el fin de llevar a cabo el mismo, este se calcula por medio de la ecuación 3.6 (Blank y Tarquin, 2012).

$$\frac{B}{C} = \frac{VPN_B}{VPN_C} \quad \text{Ec. 3.6}$$

Donde B : Beneficios (\$), C : Costos (\$), VPN_B : Valor presente neto de los beneficios (\$) y VPN_C : Valor presente neto de los costos (\$). Blank y Tarquin, 2012, establecen los siguientes criterios de selección para la relación Beneficio-Costo:

- Si $B/C > 1$, el proyecto es económicamente aceptable
- Si $B/C < 1$, el proyecto no es económicamente aceptable

4. METODOLOGÍA

La evaluación técnica se realizó para la zafra 2021-2022, teniendo como primer paso la ubicación de los puntos de muestreo para la caracterización fisicoquímica de las corrientes del proceso, así como para calcular el caudal volumétrico individual por medio de balances de materia en el estado actual de la planta. Conociendo la característica de flujo de cada punto, se compararon los valores obtenidos con los datos pertenecientes a la zafra 2020-2021, periodo previo a la reingeniería, con el fin de evaluar el impacto técnico obtenido.

Una vez realizado el análisis entre ambos periodos, se procedió a determinar la dosis óptima de floculante acorde a la cantidad de sólidos suspendidos totales encontrados en el agua homogeneizada, y así mejorar las condiciones existentes en la planta, determinando de igual forma la eficiencia de remoción del sistema para ambos escenarios.

Finalmente, se evaluó el aporte económico entregado por reingeniería y adecuada implementación de floculante al proceso utilizando el método “relación Beneficio-Costo”, tomando como comparativa la inversión inicial del proyecto de mejora a la planta y los ahorros obtenidos por mantenimiento y operación.

4.1. Ubicación de los puntos de muestreo

En la tabla 4.1 se establecieron las corrientes involucradas en el tratamiento junto a los puntos que fueron asignados a estas. La numeración indica el orden que sigue este proceso.

Tabla 4.1 Puntos de muestro correspondientes a las corrientes involucradas

| Corriente | Punto |
|---|--|
| Agua homogeneizada | 1 |
| Agua filtrada | 2 |
| Lodos concentrados | 3 |
| Agua clarificada | 4 |
| Lodos húmedos | 5 |
| Lodos hacia volquetes | 6 |
| Inyección de floculante | F |
| Agua clarificada a lavado de sistema de caldera 1, 2, 3 | S ₁ , S ₂ , S ₃ |
| Agua de reposición 1 | T ₁ |
| Agua de reposición 2 | T ₂ |
| Rebozo de tanque de recolección | Rbz |

La figura 4.1. presenta el flujograma del proceso con los puntos de muestreo. La ubicación detallada de cada punto, tanto primario (azules) como secundario (rojos y verdes) se muestra a continuación:

- El punto 1 está ubicado justo después de la convergencia del sistema de bombeo PU-272. Este sistema descarga la corriente de agua homogeneizada (corriente #1) proveniente del lavado de tolvas recolectoras de ceniza y de los *scrubbers* a la planta de tratamiento.
- El punto 2 se ubica a la entrada del clarificador CL-250, en la superficie del cilindro concéntrico. La corriente que entra a este equipo, corriente #2 corresponde a la salida de agua filtrada del filtro rotativo FI-250 01.
- El punto 3 se ubica justo después de la convergencia del sistema de bombeo PU-276. El sistema recircula la corriente de lodos concentrados (*Underflow*, UF o corriente #3) al FI-250 01.
- El punto 4 se ubica en la corriente de decantación de agua clarificada (*Overflow*, OF o corriente #4) y se transporta al tanque de recolección de agua clarificada TK-474 03.
- El punto 5 está ubicado a la salida del FI-250 01, donde se tiene la corriente de lodos húmedos (corriente #5).
- El punto 6 se ubica en la masa de lodos que es recolectada en los volquetes y que se transporta desde el filtro estático FI-250 02 a través del chute. Esta corriente corresponde a la corriente #6.
- Los puntos T₁ y T₂, ubicados a la entrada del TK-474 03, corresponden a las corrientes homónimas de agua de proceso de canaletas, descargadas por el sistema de bombeo PU-320 como agua de reposición al tanque de recolección.
- Los puntos (y corrientes) S₁, S₂ y S₃ se ubican en la zona de descarga del sistema de bombeo PU-330. Estas corrientes corresponden al agua de lavado utilizada en los *scrubbers* y el lavado de tolvas. El número que las acompaña corresponde a la caldera que va dirigida la corriente.
- El punto Rbz corresponde a la corriente de rebozo del tanque de recolección; se sitúa a la salida superior del TK-474 03.
- La inyección principal de floculante se denotó como "F", y se ubica a la salida de la bomba PU-280A. Asimismo, se tienen los puntos y corrientes F₁, F₂, F₃, ramificaciones de F, y referidos a la inyección de floculante a la corriente #1, corriente #2, y corriente #3, respectivamente.

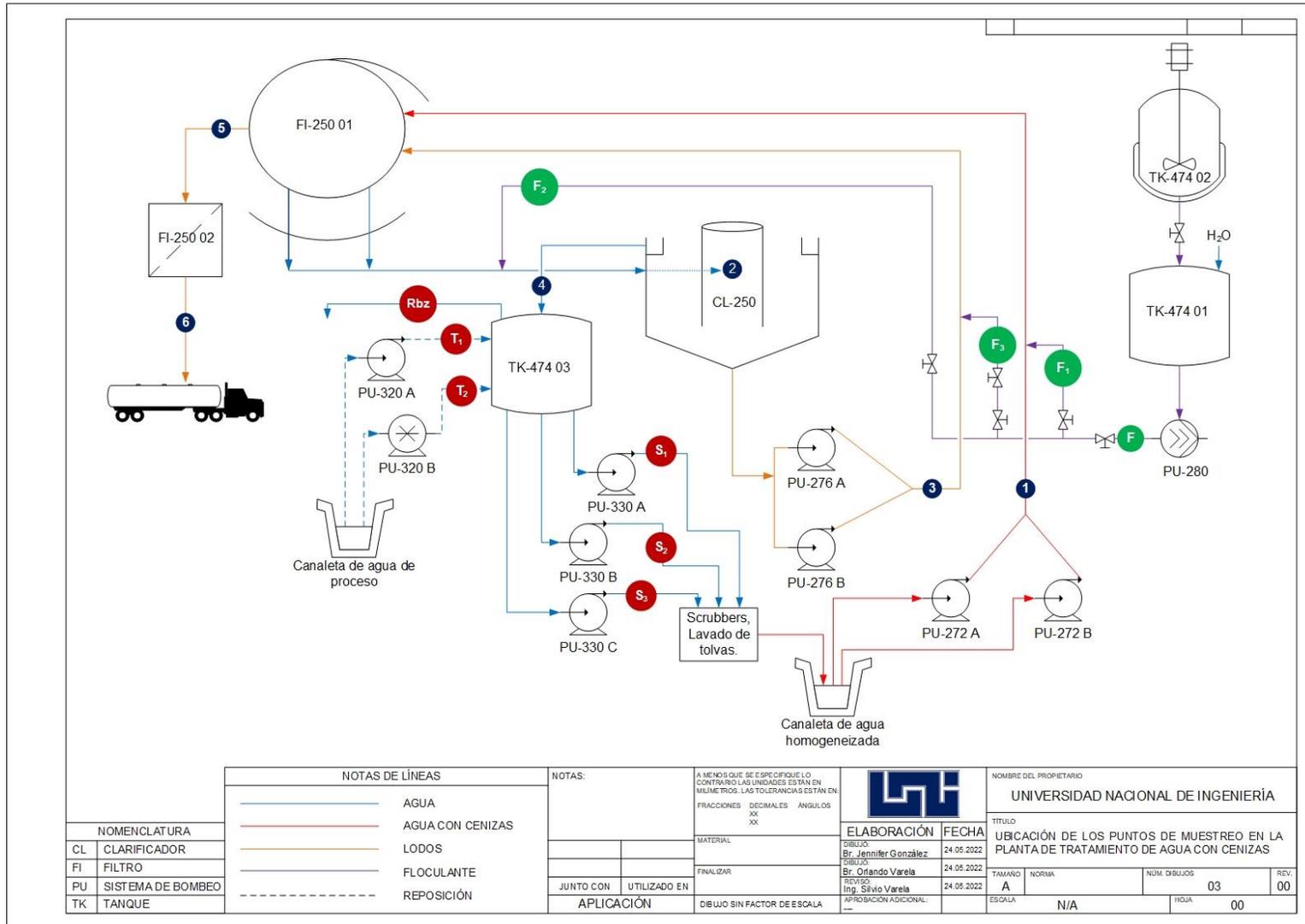


Figura 4.1 Ubicación de puntos de muestreo de la planta de tratamiento de agua con cenizas. Elaboración propia

Los puntos de muestreo utilizados fueron los ya designados por el Ingenio San Antonio. Éstos se ubicaron tomando como principal variable la concentración de SST; cada punto ubicado se encuentra antes y/o después de un proceso que altera la concentración de SST, siendo esto representativo para caracterizaciones de las distintas corrientes del proceso.

4.2. Caracterización fisicoquímica de afluentes y efluentes

Las mediciones y los cálculos de los distintos parámetros para las corrientes #1, #2, #3 y #5, se realizaron tomando muestras diarias en el período de zafra 2021-2022 (Z21-22), del día 7 de enero al 6 de marzo de 2022. En el caso de la corriente #4, las muestras se tomaron en el mismo periodo de tiempo, con la diferencia que se realizaron ocho réplicas de muestreo por día, con tres horas de diferencia entre análisis.

Se debe tomar en consideración las siguientes observaciones antes de la caracterización de las muestras:

- Las muestras de agua de las corrientes #1 a la #4 se transportaron al laboratorio por medio de baldes de plástico de aproximadamente 3 L.
- La muestra de lodos de la corriente #5 se tomó en un frasco de plástico de 500 ml.
- No se realizó muestreo del punto 6 debido al estado del filtro estático, el cual presentaba obstrucción total de la malla, funcionando solamente como una rampa para dirigir los lodos desde el filtro rotativo hacia el chute.
- Se realizó el análisis del comportamiento de cada parámetro con respecto a límites establecidos por el Ingenio San Antonio, para saber si la operación se encuentra dentro de la calidad requerida.

Los análisis realizados a cada uno de los puntos de muestreo se presentan en la tabla 4.2.

Para la determinación y medición de los parámetros descritos, se utilizó cristalería, reactivos, equipos y materiales proporcionados por el laboratorio de agua de procesos del área de cogeneración; asimismo, un analista de planta fue asignado por el ingenio, junto al cual se llevó a cabo la siguiente metodología para el monitoreo de los parámetros.

Tabla 4.2 Parámetros de caracterización de afluentes y efluentes

| Parámetros | Unidades | Puntos de muestreo | | | | | |
|----------------------------------|----------------------|-----------------------|------------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------|----------------------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| | | Agua homogeneizada | Agua filtrada | Lodos concentrados (UF) | Agua clarificada (OF) | Lodos húmedos | Lodos en el volquete |
| Densidad de la mezcla | g/ml | X | X | X | | | |
| Contenido de humedad | %m/m | | | | | X | |
| Densidad de sólidos en base seca | g/ml | | | | | X | |
| Dosis de floculante | ppm | X | | | | | |
| Sólidos suspendidos totales | ppm o %m/m | X | | X | X | | |
| pH | - | X | | | X | | |
| Temperatura | °F | X | | | X | | |
| Sólidos totales disueltos | ppm | X | | | X | | |
| Dureza total | ppmCaCO ₃ | X | | | X | | |
| Alcalinidad total | ppmCaCO ₃ | X | | | X | | |
| Índice de Ryznar | - | X | | | X | | |
| Masa de lodos | ton | | | | | | X |

4.2.1. Determinación de la densidad de la mezcla

Se taró una báscula con un balón de aforo de 50 ml. Posterior a ello, se tomó una muestra de la corriente correspondiente; ésta se agitó, se aforó, y se pesó. Teniendo determinada la masa y volumen de la muestra, se procedió a calcular la densidad de la mezcla, como lo establece la ecuación 4.1:

$$\rho_{ML} = \frac{m_{ML}}{V_{ML}} \quad \text{Ec. 4.1}$$

Donde ρ_{ML} : densidad de la mezcla (g/ml), m_{ML} : masa de la mezcla (g), y V_{ML} es el volumen de la mezcla (ml).

4.2.2. Determinación de la masa de sólidos en base seca y humedad

4.2.2.1. Para los puntos 1 y 3

El equipo utilizado para esta prueba fue un analizador de humedad marca Sartorius, modelo MA160 con una precisión de ± 1 mg. Primero, se secó un papel filtro de membrana de 0.45 micrones y se taró en el analizador. El papel filtro fue colocado en el equipo de filtración por membrana, el cual fue previamente ajustado para recibir la muestra.

Posteriormente, se agitó el contenedor de la muestra de la corriente a analizar, se tomó una muestra de 50 ml e inmediatamente se pesó en una balanza, denotando su masa como m_M (g). La muestra se filtró luego de su pesaje, el agua obtenida se colocó en un beaker, mientras que el papel filtro con los sólidos se pesaron en el analizador de humedad, dando como resultado la masa sólidos en base húmeda m_{LBH} (g), para finalmente ser secados utilizando el mismo equipo obteniendo la masa de sólidos en base seca m_{LBS} (g) y su humedad %H (%m/m).

4.2.2.2. Para el punto 5

Se secaron 3 g de lodo húmedo en el analizador de humedad Sartorius MA160 ± 1 mg, lo que dio como respuesta la masa de sólidos en base seca m_{LBS} (g). A su vez, el porcentaje registrado en la pantalla del equipo correspondía al porcentaje de humedad %H (%m/m) en base húmeda de los lodos a la salida del sistema de tratamiento de agua con cenizas.

El sólido seco se apartó para determinar la cantidad sólidos suspendidos totales y la densidad de sólidos en base seca, descritos en el acápite 4.2.3 y 4.2.4 respectivamente.

4.2.3. Determinación del contenido de sólidos suspendidos totales

4.2.3.1. Determinación en puntos 1 y 3

Una vez conocida la masa de sólidos en base seca y la masa de la muestra, se calculó el contenido de sólidos suspendidos totales (SST) presentes en la muestra por medio de la ecuación 4.2:

$$C_{SST} = \left(1 - \frac{m_M - m_{LBS}}{m_M}\right) * 100 \quad \text{Ec. 4.2}$$

Donde C_{SST} : concentración de SST (%m/m), m_{LBS} : masa de sólidos en base seca (g) y m_M : masa de la muestra (g).

4.2.3.2. Determinación en punto 4

La medición de la concentración de sólidos suspendidos totales en el agua clarificada se llevó a cabo en un espectrofotómetro de la marca HACH modelo DR 3900 a una precisión de ± 1.5 nm. El equipo se ajustó para el programa "630 Sólidos en suspensión".

Para las muestras, se utilizaron dos celdas de 25 ml, limpias y secas. La primera celda tenía un contenido de 10 ml de agua destilada, la cual se ajustó como blanco del programa, mientras que la segunda celda contenía 10 ml de muestra previamente agitada. Una vez que se colocó la celda con la muestra en el espectrómetro, se dio inicio al análisis, obteniendo como respuesta la concentración de SST, la cual se denotó como C_{SST} (ppm).

4.2.4. Determinación de la densidad de SST en base seca

Se siguió el principio de Arquímedes para la determinación de la densidad sólidos en base seca, el cual establece que el volumen desplazado por un sólido sumergido en un fluido será igual al volumen real del sólido (Hewitt, 2009). Para ello, en una probeta graduada de 25 ml, se adicionaron 10 ml de agua.

Posteriormente, se agregaron a la probeta los SST secos obtenidos en el acápite 4.2.2 y se registró el volumen de agua desplazado. El cálculo se realizó por medio de la ecuación 4.3.

$$\rho_{LBS} = \frac{m_{LBS}}{V_{Desp}} \quad \text{Ec. 4.3}$$

Donde m_{LBS} : masa de sólidos en base seca (g), V_{Desp} : volumen de agua desplazada (ml) y ρ_{LBS} : densidad de lodos en base seca (g/ml).

4.2.5. Medición de potencial de hidrógeno y temperatura

Para la medición de potencial de hidrógeno (pH) y temperatura (T , °C), se utilizó un medidor de la marca OHAUS modelo Starter 3100 con una precisión de ± 0.01 pH , ± 0.5 °C. El electrodo del equipo se lavó con agua destilada y se secó utilizando papel toalla previo al análisis.

En un frasco plástico para toma de muestra, se adicionaron 100 ml de agua clarificada, luego, se colocó el electrodo del medidor OHAUS Starter dentro del frasco, y se esperó hasta que las mediciones en la pantalla permanecieron constantes. Una vez alcanzada la estabilidad, se registraron los valores de pH y temperatura T (°C) mostrados en pantalla.

4.2.6. Determinación de la concentración de sólidos totales disueltos

La concentración de sólidos totales disueltos (STD) se calculó por medio de la ecuación 4.4, establecida por el personal del laboratorio y corroborada por Rusydi, 2018. En ella, se expone que la concentración de STD es igual a 0.7 veces la conductividad eléctrica de la muestra:

$$C_{STD} = 0.7G \quad \text{Ec. 4.4}$$

Donde C_{STD} es la concentración de STD (ppm) y G es la conductividad eléctrica ($\mu S/cm$).

La conductividad eléctrica G se midió utilizando un conductímetro Orion 4 Star ± 0.2 $\mu S/cm$. Previo a la medición, el electrodo del equipo se lavó con agua destilada y se secó utilizando papel toalla.

La medición se realizó utilizando la muestra del acápite 4.2.5. Se colocó el electrodo del conductímetro dentro del frasco, y se esperó que la medición de la pantalla se estabilizara, obteniendo el valor de G .

4.2.7. Determinación de la concentración de dureza total

Para el cálculo de la concentración de dureza total C_{DT} , se siguió la metodología propuesta por la norma de la American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana Para Pruebas y Materiales [ASTM], 2002).

Se tomó una muestra de 25 ml de agua clarificada y se le agregaron 2 ml de una solución tampón y 50 mg de indicador de negro de eriocromo T; la solución se agitó hasta obtener un color morado.

Posteriormente, se realizó una titulación volumétrica utilizando solución estándar de EDTA (0.01 M) como valorante, la cual se detuvo una vez que el color de la muestra cambió de morado a azul. Con el volumen de titulante utilizado a la concentración especificada y su equivalencia (1 ml = 1 mg CaCO_3), se calculó la concentración de dureza total con la ecuación 4.5:

$$C_{DT} = \frac{C_{\text{CaCO}_3} * V_{\text{EDTA}}}{V_M} \quad \text{Ec. 4.5}$$

Donde C_{DT} : concentración de dureza total (ppm CaCO_3), C_{CaCO_3} : concentración de carbonato de calcio por volumen utilizado de EDTA (mg/ml), V_{EDTA} : volumen utilizado de EDTA (ml), y V_M : volumen de la muestra (L).

4.2.8. Determinación de la alcalinidad total

La determinación de este parámetro se realizó siguiendo el procedimiento de Clesceri, Greenberg, y Eaton (1999). Primero, se tomó una muestra de 50 ml de agua clarificada y se le agregaron 0.2 ml de solución indicadora M (naranja de metilo con bromocresol); la mezcla se agitó hasta obtener un color verde azulado.

Posteriormente, se realizó una titulación volumétrica, utilizando solución estándar de H_2SO_4 (0.02 N) como valorante. El viraje de la muestra se da cuando el verde azulado cambia a color salmón. Con el volumen de titulante utilizado y el peso equivalente del CaCO_3 , se calculó la concentración de alcalinidad total con la ecuación 4.6:

$$C_{AT} = \frac{V_{H_2SO_4} * C_{H_2SO_4} * PE_{CaCO_3}}{V_M} \quad \text{Ec. 4.6}$$

Donde C_{AT} : concentración de alcalinidad total (ppm $CaCO_3$), $C_{H_2SO_4}$: concentración de ácido sulfúrico (N), $V_{H_2SO_4}$: volumen utilizado de ácido sulfúrico (ml), PE_{CaCO_3} : peso equivalente del $CaCO_3$ (50 mg/meq) y V_M : volumen de la muestra (L).

4.2.9. Determinación del índice de incrustación

Para la corriente de agua clarificada correspondiente al punto 4, se calculó el índice de Ryznar (IRz) utilizando la ecuación 4.7, planteada por Mora y Cedeño (2006):

$$IRz = 2pH_s - pH \quad \text{Ec. 4.7}$$

$$pH_s = (9.3 + A + B) - (C + D) \quad \text{Ec. 4.8}$$

Dónde IRz es el índice de Ryznar (-), pH_s es el pH estándar (-) y los factores A , B , C y D se calculan por medio de las ecuaciones 4.9, 4.10, 4.11 y 4.12 respectivamente:

$$A = \frac{\text{Log}[C_{STD}] - 1}{10} \quad \text{Ec. 4.9}$$

$$B = -13,12 * \text{Log}[T(^{\circ}K)] + 34.55 \quad \text{Ec. 4.10}$$

$$C = \text{Log}[C_{DT}] - 0.4 \quad \text{Ec. 4.11}$$

$$D = \text{Log}[C_{AT}] \quad \text{Ec. 4.12}$$

Para determinar si el agua clarificada posee propiedades incrustantes o corrosivas, se consultaron los criterios detallados en la tabla 3.2.

4.2.10. Determinación de la masa de lodos húmedos

Para determinar la masa de lodos húmedos se utilizaron básculas eléctricas industriales para medir tanto los volquetes vacíos como los volquetes ya cargados de lodo.

Primeramente, se pesaron los volquetes vacíos cuando entraban a la planta; se marcó como tiempo inicial el momento en el cual empezaron a cargarse de lodos, y como tiempo final el momento en que los volquetes dejaban de ser cargados y se dirigían hacia las básculas para el pesaje

Utilizando las masas registradas luego del pesaje, se calculó la masa real de lodos por medio de la ecuación 4.13:

$$m_{LF} = m_{VLL} - m_{VV} \quad \text{Ec. 4.13}$$

Donde m_{LF} : masa de lodos finales (ton), m_{VLL} : masa de volquete lleno (ton) y m_{VV} : masa de volquete vacío (ton)

Simultáneamente, se midió el tiempo de llenado de los volquetes utilizando la ecuación 4.14:

$$t_{LL} = t_F - t_0 \quad \text{Ec. 4.14}$$

Donde t_{LL} : tiempo de llenado (min), t_F : tiempo final (min) y t_0 : tiempo inicial (min).

El flujo másico de lodos a la salida del filtro rotativo se calculó como se establece en el título 4.3.

4.3. Medición de caudal en las corrientes

Las mediciones de caudal se realizaron utilizando un caudalímetro ultrasónico PT900 $\pm 1\%$. Para utilizar este equipo, se mantuvo un espacio entre sus sensores de tres veces el diámetro de la tubería en los puntos de medición. Los sensores se colocaron paralelos a la dirección del flujo de la corriente para conseguir una lectura precisa.

4.3.1. Medición de caudal para la corriente de agua homogeneizada

Utilizando el caudalímetro PT900, se midió el caudal de la corriente #1, el cual se denotó como Q_{P1} (m^3/h).

4.3.2. Medición del caudal de lodos concentrados

Utilizando el caudalímetro PT900, se midió el caudal de la corriente #3, el cual se denotó como Q_{P3} (m^3/h).

4.3.3. Medición de caudales de las corrientes de entrada y salida del tanque de recuperación de agua clarificada

Se midieron los caudales de las corrientes de agua de reposición y las corrientes de agua de lavado, las cuales se detallan en el acápite 4.1. Los caudales volumétricos de estas corrientes se denotaron de la siguiente forma:

- Q_{T1} : Caudal volumétrico de la corriente T_1 (m^3/h)
- Q_{T2} : Caudal volumétrico de la corriente T_2 (m^3/h)
- Q_{S1} : Caudal volumétrico de la corriente S_1 (m^3/h)
- Q_{S2} : Caudal volumétrico de la corriente S_2 (m^3/h)
- Q_{S3} : Caudal volumétrico de la corriente S_3 (m^3/h)

4.4. Cálculo de caudal en las corrientes

Los cálculos de los distintos caudales se realizaron utilizando balances de materia en estado estacionario, ya que se trabaja con un proceso continuo.

Los volúmenes de control con los cuales se desarrollaron los balances de materia se delimitaron utilizando como base la figura 4.1, mientras que el desarrollo de cada balance de materia se exponen en el Apéndice C.

4.4.1. Balance global del proceso

En la figura 4.2 se muestra el volumen de control empleado para la aplicación del balance global del proceso, permitiendo a través de este balance la determinación el flujo volumétrico de la corriente 4

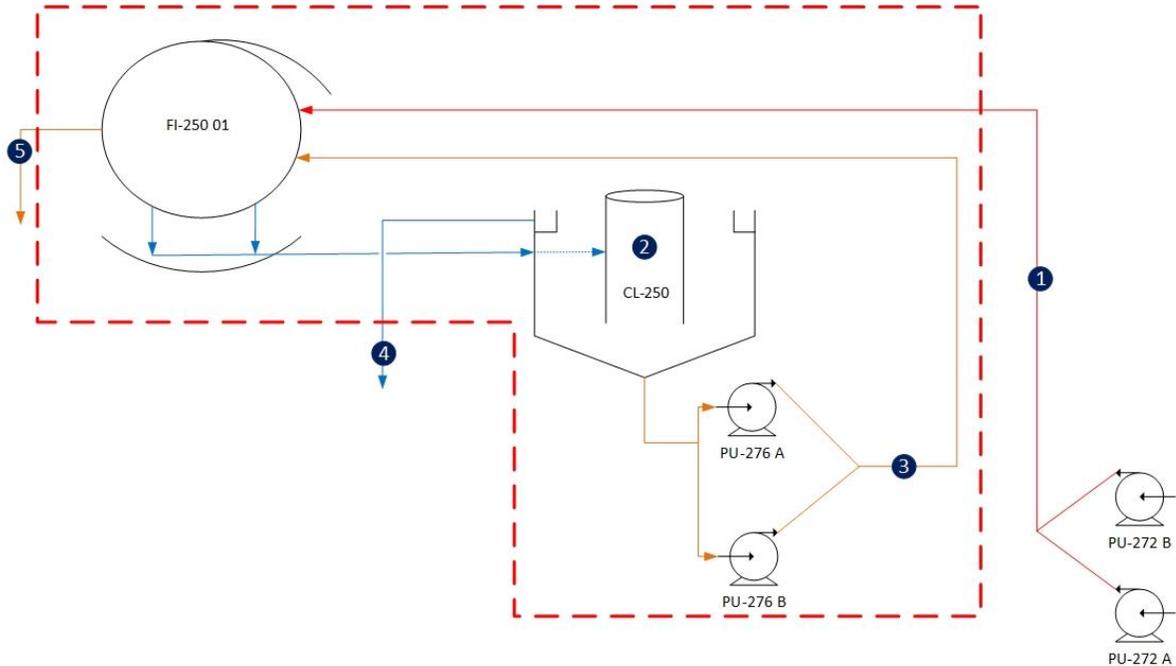


Figura 4.2. Volumen de control de la planta de tratamiento de agua con cenizas

Las corrientes involucradas en el balance global se presentan en la tabla 4.3, mientras que el balance resultante de las corrientes está dado por la ecuación 4.15

$$(\rho Q)_{P1} = (\rho Q)_{P4} + (\rho Q)_{P5} \quad \text{Ec. 4.15}$$

Donde Q_{P1} : caudal volumétrico de la corriente #1 (m^3/h), Q_{P4} : caudal volumétrico del corriente #4 (m^3/h), Q_{P5} : caudal volumétrico de la corriente #5 (m^3/h), ρ_{P1} : densidad de la corriente #1 (ton/m^3), ρ_{P4} : densidad de la corriente #4 (ton/m^3), y ρ_{P5} : densidad de la corriente #5 (ton/m^3).

Tabla 4.3. Corrientes involucradas en el balance global de proceso

| Corriente | Punto de muestro | Caudal | Dirección |
|--------------------|------------------|----------|-----------|
| Agua homogeneizada | 1 | Q_{P1} | Entrada |
| Agua clarificada | 4 | Q_{P4} | Salida |
| Lodos húmedos | 5 | Q_{P5} | Salida |

4.4.2. Cálculo de caudal de lodos hacia volquetes

Los caudales de las corrientes #5 y #6 se consideraron iguales debido a la saturación de sólidos en la malla del filtro estático, la cual evita un cambio representativo en la composición de la corriente.

Utilizando la masa de lodos finales calculada con la ecuación 4.13, y el tiempo de llenado calculado con la ecuación 4.14, se calculó el caudal másico de la corriente de lodos húmedos a la salida del filtro rotativo, utilizando la ecuación 4.16:

$$\dot{m}_{P5} = \frac{m_{LF}}{t_{LL}} \quad \text{Ec. 4.16}$$

Donde m_{LF} : masa de lodos finales (ton), \dot{m}_{P5} : caudal másico de lodos húmedos (ton/h) y t_{LL} : tiempo de llenado (h).

Con la densidad de la mezcla calculada con la ecuación Ec. 4.1 y \dot{m}_{P5} , se determinó el caudal volumétrico de la corriente de lodos húmedos, utilizando la ecuación 4.17:

$$Q_{P5} = \frac{\dot{m}_{P5}}{\rho_{P5}} \quad \text{Ec. 4.17}$$

Donde Q_{P5} : caudal volumétrico de la corriente #5 (m^3/h), \dot{m}_{P5} : caudal másico de lodos húmedos (ton/h) y ρ_{P5} : densidad de la corriente #5 (ton/m^3).

4.4.3. Cálculo de caudal de agua clarificada

Posterior a la determinación de Q_{P5} , se calculó el caudal de agua clarificada a la salida del CL-250. Se despejó la ecuación 4.15 perteneciente al balance global, obteniéndose como resultado la ecuación 4.18:

$$(\rho Q)_{P4} = (\rho Q)_{P1} - (\rho Q)_{P5} \quad \text{Ec. 4.18}$$

Donde Q_{P4} : caudal volumétrico de la corriente #4 (m^3/h), Q_{P1} : caudal volumétrico de la corriente #1 (m^3/h), Q_{P5} : caudal volumétrico de la corriente #5 (m^3/h), ρ_{P1} : densidad de la corriente #1 (ton/m^3), ρ_{P4} : densidad de la corriente #4 (ton/m^3), y ρ_{P5} : densidad de la corriente #5 (ton/m^3).

4.4.4. Cálculo de caudal de agua filtrada

Por normativas de seguridad, no se logró medir el caudal de la corriente de agua filtrada utilizando el caudalímetro PT900, así que se determinó por medio de balances de materia, que tuvo como volumen de control el clarificador CL-250 y el sistema de bombeo PU-276, a como se establece en figura 4.3.

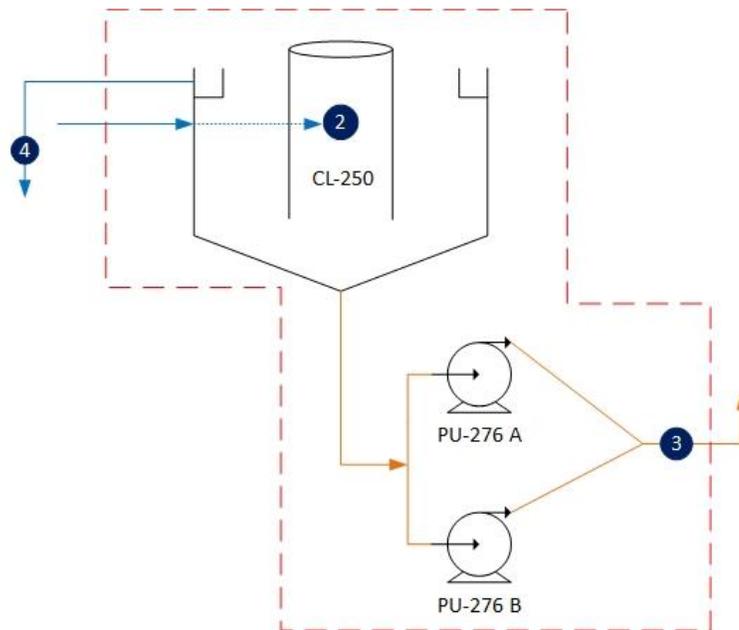


Figura 4.3 Volumen de control del clarificador

Tabla 4.4 Corrientes del balance de materia del CL-250 y el PU-276

| Corrientes | Punto de muestreo | Caudal | Dirección |
|--------------------|-------------------|----------|-----------|
| Agua filtrada | 2 | Q_{P2} | Entrada |
| Lodos concentrados | 3 | Q_{P3} | Salida |
| Agua clarificada | 4 | Q_{P4} | Salida |

El balance de materia da como resultado la ecuación 4.19, que permitió calcular el caudal de la corriente de agua filtrada, siendo ésta la misma correspondiente a la alimentación del clarificador.

$$Q_{P2} = \frac{(\rho Q)_{P3} + (\rho Q)_{P4}}{\rho_{P2}} \quad \text{Ec. 4.19}$$

Donde Q_{P2} : caudal volumétrico de la corriente #2 (m^3/h), Q_{P3} : caudal volumétrico de la corriente #3 (m^3/h), Q_{P4} : caudal volumétrico de la corriente #4 (m^3/h), ρ_{P2} : densidad de la corriente #2 (ton/m^3), ρ_{P3} : densidad del punto #3 (ton/m^3) y ρ_{P4} : densidad de la corriente #4 (ton/m^3).

4.4.5. Cálculo de caudal de rebozo del tanque de recuperación agua clarificada

El tercer y último volumen de control se delimitó en el tanque TK-474 03, a como lo establece la figura 4.4. Se realizaron los balances de materia, con las corrientes especificadas en la tabla 4.5.

Tabla 4.5 Corrientes involucradas en el balance de materia del TK-474 03

| Corriente | Punto de muestreo | Caudal | Dirección |
|-------------------------------------|-------------------|-----------|-----------|
| Agua clarificada | 4 | Q_{P4} | Entrada |
| Agua de reposición 1 | T ₁ | Q_{T1} | Entrada |
| Agua de reposición 2 | T ₂ | Q_{T2} | Entrada |
| Agua a sistema de lavado, Caldera 1 | S ₁ | Q_{S1} | Salida |
| Agua a sistema de lavado, Caldera 2 | S ₂ | Q_{S2} | Salida |
| Rebozo de tanque clarificado | Rbz | Q_{Rbz} | Salida |

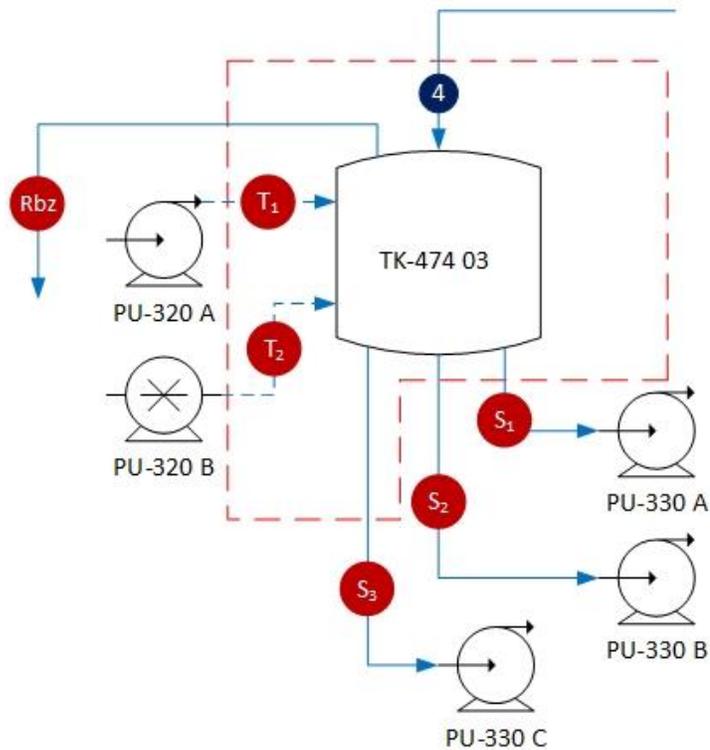


Figura 4.4 Volumen de control del tanque de recolección agua clarificada

Antes de desarrollar los balances de materia, se consideraron las siguientes condiciones del proceso:

- La bomba PU-330 C no se encuentra en operación, por lo que la corriente S_3 no será considerada.
- La entrada de las corrientes T_1 y T_2 es mutuamente excluyente.
- $Q_{T_2} > Q_{T_1}$.
- $Q_{Rbz} = 0$ cuando T_1 es la corriente de entrada.

Con estas observaciones, el balance de materia dio como resultado la ecuación 4.20, que permite calcular el caudal de la corriente de rebozo de agua del TK-474 03, considerando T_2 como la única corriente de entrada de agua de reposición.

$$Q_{Rbz} = \frac{(\rho Q)_{P4} + (\rho Q)_{T2} - ((\rho Q)_{S1} + (\rho Q)_{S2})}{\rho_{Rbz}} \quad \text{Ec. 4.20}$$

Donde Q_{Rbz} : caudal volumétrico del rebozo (m^3/h), Q_{T2} : caudal volumétrico de la corriente T_2 (m^3/h), Q_{P4} : caudal volumétrico de la corriente #4 (m^3/h), Q_{S1} : caudal volumétrico de agua clara al sistema de lavado HPB1 (m^3/h), Q_{S2} : caudal volumétrico de agua clara al sistema de lavado HPB2 (m^3/h), ρ_{Rbz} : densidad de la corriente del rebozo (ton/m^3), ρ_{T2} : densidad de la corriente T_2 (ton/m^3), ρ_{P4} : densidad de la corriente #4 (ton/m^3), ρ_{S1} : densidad de la corriente de agua clara al sistema de lavado HPB1 (ton/m^3), ρ_{S2} : densidad de la corriente de agua clara al sistema de lavado HPB2 (ton/m^3).

4.5. Determinación de dosis óptima de floculante

4.5.1. Cálculo de carga superficial

Se utilizó el caudal de la corriente de agua filtrada y el área superficial del CL-250 para calcular la carga superficial del sistema de clarificación, tal como se expone en la ecuación 4.21:

$$CS = \frac{Q_{P2}}{A_{Sup}} \quad \text{Ec. 4.21}$$

Donde CS : carga superficial (m/h), Q_{P2} : caudal de la corriente #2 (m^3/h) y A_{Sup} : área superficial del clarificador, equivalente a 50.2 m^2 (Ver apéndice D.1).

Acorde a los criterios del Ingenio San Antonio, la velocidad de sedimentación debe ser de tres a seis veces mayor que la carga superficial.

$$V_S = (3 \text{ a } 6) * CS \quad \text{Ec. 4.22}$$

Donde V_S : velocidad de sedimentación (cm/s) y CS : carga superficial (cm/s).

Para alcanzar una sedimentación adecuada, se dosificó floculante N-7128 en la corriente de agua homogeneiza, utilizando los puntos de dosificación F_1 y F_2 como dosificaciones auxiliares, para aumentar la concentración residual en la recirculación. Este se preparó a como lo establece el acápite 4.5.2, y su dosis óptima se estimó según el acápite 4.5.3.

4.5.2. Preparación de floculante

Se preparó floculante catiónico marca N-7128 a 0.1% (Ver Apéndice D.2), tomando la muestra de floculante directamente de los barriles donde se almacena el químico. Debido a que este producto es una emulsión, antes de tomar la muestra fue necesario mezclar hasta obtener una sustancia homogénea; esto se logró utilizando un compresor de aire presurizado, el cual se introdujo en el barril con el fin de proporcionar el movimiento suficiente para que se creara una sola fase de emulsión.

Luego de homogeneizar el floculante, se disolvió una muestra de 1 g en 200 ml de agua previamente agregada en un balón de aforo de 1 L. Se agitó vigorosamente para evitar la deposición de floculante en las paredes de la cristalería.

Posteriormente, el balón se aforó con agua y se agitó hasta que el N-7128 se disolvió en su totalidad. Debido a la formación de burbujas, se repitió el proceso de agitación y aforo hasta que se mantuvo el nivel requerido según la marca del balón. El tiempo de maduración del floculante fue de 2 horas.

La equivalencia de floculante N-7128 a 0.1% indica que, cuando 1 ml de floculante diluido es agregado a una muestra de 1 L, la concentración de floculante en la muestra equivaldría a 1 ppm N-7128. Para especificaciones del floculante utilizado referirse al Apéndice D.3.

4.5.3. Pruebas de cilindros

Se tomaron 4 muestras de 5 000 ml de la corriente de agua homogenizada, las cuales tuvieron las siguientes concentraciones de %SST:

- 0.67% SST
- 0.83% SST
- 1.10% SST
- 1.16% SST

Se tomó una de las muestras, la cual se agitó, y repartió equitativamente en cinco probetas de 1 000 ml, procurando repartir el contenido justo al finalizar la agitación. Las probetas fueron enumeradas del #0 al #4, y marcadas en el nivel 1 000 ml cada una. Seguidamente, se tomaron las probetas, dosificándose la cantidad de floculante especificada en la tabla 4.6 y se agitaron de arriba hacia abajo cuatro veces para lograr homogenización de la mezcla. Para evitar derrames, la agitación se realizó colocando ambas manos en los extremos de las probetas (Kemmer, 1988).

Tabla 4.6: Dosificaciones de floculante al 0.1% en cada juego de probetas

| Número de probeta | Volumen de N-7128 (ml) |
|-------------------|------------------------|
| #0 | 0 |
| #1 | 0.5 |
| #2 | 1 |
| #3 | 1.5 |
| #4 | 2 |

Al finalizar la agitación, se colocó la probeta sobre una superficie plana y se evaluó la velocidad de sedimentación de las partículas, marcándose el nivel de los sólidos sedimentándose en intervalos de diez segundos.

La prueba se detuvo hasta que se observó un valor constante en la altura de la interface, luego se procedió a medir la altura entre cada marca. Con estos valores, se siguió la ecuación 4.23 para determinar el nivel de la interface respecto al tiempo.

$$h_t = h_0 - \Delta h \quad \text{Ec. 4.23}$$

Donde h_0 : Altura inicial de los sólidos en la probeta (cm) h_t : altura de sedimentación en función del tiempo (cm) y Δh : diferencia entre altura inicial y altura de sedimentación respecto al tiempo (cm).

El proceso se repitió para las cuatro muestras faltantes. Posteriormente, en una tabla de datos, se organizaron los valores de h_t con sus tiempos de sedimentación para cada probeta. Se determinaron las velocidades de sedimentación mediante la ecuación 4.24:

$$V_s = \frac{h_t}{t_s} \quad \text{Ec. 4.24}$$

Donde V_s : Velocidad de sedimentación (cm/s), h_t : nivel de sedimentación en función del tiempo (cm), t_s : tiempo de sedimentación (s). Este proceso se repitió para las muestras restantes a distintos %SST.

Una vez terminada cada prueba, las muestras se dejaron reposar por un tiempo equivalente al tiempo de retención en el clarificador, es decir, 15 minutos. Terminado este tiempo, el agua fue extraída para realizar la medición de la concentración de sólidos suspendidos totales presentes, tal como se expone en el acápite 4.2.3.2 con el fin de comparar las concentraciones obtenidas con las dosificaciones de floculante.

4.6. Determinación de eficiencia remoción del proceso

4.6.1. Eficiencia de filtro rotativo

La eficiencia del filtro rotativo se expresa como la relación entre el contenido de SST en la corriente de agua filtrada y el contenido de SST en las corrientes a la entrada de este. La eficiencia se calculó utilizando la ecuación 4.25:

$$\eta_{FIROT} = \frac{m_{SSTP5}}{(m_{SSTP1} + m_{SSTP3})} * 100 \quad \text{Ec. 4.25}$$

Donde η_{FIROT} : eficiencia del filtro rotativo (%m/m), m_{SSTP3} : masa de SST en la corriente #3 (ton), m_{SSTP5} : masa de SST en la corriente #5 (ton), m_{SSTP1} : masa de SST en la corriente #1 (ton).

4.6.2. Eficiencia de clarificador

La eficiencia del clarificador se determinó por medio de la relación de contenido de SST entre las corrientes #4 y #2, a como se establece en la ecuación 4.26:

$$\eta_{CL} = \left(1 - \left(\frac{m_{SSTP4}}{m_{SSTP2}} \right) \right) * 100 \quad \text{Ec. 4.26}$$

Donde η_{CL} : eficiencia del clarificador (%m/m) y m_{SSTP2} : masa de SST en la corriente #2 (ton), m_{SSTP4} : masa de SST en la corriente #4 (ton).

4.6.3. Eficiencia general del proceso

La eficiencia general del proceso está dada por la remoción de contenido de SST que entran al tratamiento. Para este cálculo se estableció una relación entre el contenido de SST en la corriente #1 y el contenido de SST en la corriente #4. Para calcular la eficiencia de remoción, se utilizó la ecuación 4.27:

$$\eta_{Planta} = \left(1 - \left(\frac{m_{SSTP4}}{m_{SSTP1}} \right) \right) * 100 \quad \text{Ec. 4.27}$$

Donde η_{Planta} : eficiencia de la planta (%m/m), m_{SSTP4} : masa de SST en la corriente #4 (ton), y m_{SSTP1} : masa de SST en la corriente #1 (ton).

Otro parámetro para medir la eficiencia del proceso es el contenido de humedad de los lodos húmedos, que se midió a como se establece en el acápite 4.2.2. Este contenido de humedad debía ser menor a 80% para considerar que el proceso es eficiente.

4.6.4. Factor de capacidad

Se calculó el factor de capacidad de la planta, respecto a la capacidad total actual procesada por el sistema. La relación se calculó a través del cociente entre el caudal procesado de la planta para zafra 20-21 y el caudal máximo de la planta, siendo este valor de 1 100 m³/h. Se realizó el mismo cálculo para zafra 21-22.

La ecuación de factor de capacidad está dada por la ecuación 4.28:

$$FC = \frac{Q_{Pi}}{Q_{Máx}} \quad \text{Ec. 4.28}$$

Dónde FC : factor de capacidad, $Q_{Máx}$: capacidad máxima de la planta (m³/h), y Q_{Pi} : caudal de operación para la zafra correspondiente.

4.7. Análisis de la relación Beneficio-Costo

Este análisis se realizó a partir del año 2021, ya que fue cuando se rediseñó el sistema de clarificación y se implementaron otras mejoras; se tomó la suma de esas inversiones como la inversión inicial P_0 . No se realizó una equivalencia del valor de la planta de 2014 a 2021, debido a que el tiempo de vida útil que se le da a los proyectos es de 5 años (3 para el ingenio San Antonio), por lo que, al día de

hoy, la planta se encuentra totalmente depreciada. La *TMAR* con la que se evalúan los proyectos de la empresa es de 15%.

4.7.1. Flujo Neto de Efectivo

Utilizando como base la tabla 3.3, se determinó el FNE por medio de un balance económico general, por lo que fue necesario determinar los costos en los que incurre la planta de tratamiento actualmente, los ingresos generados a partir del rediseño de la planta, y la inversión inicial realizada por la compañía.

4.7.1.1. Cálculo de costos

Los costos que se tomaron en cuenta para el cálculo de los costos totales se detallan en tabla 4.7.

Tabla 4.7: Descripción de los tipos de costo

| Tipo de costo | Descripción |
|-------------------------------------|--|
| Costos de producción | Insumos químicos, energía eléctrica, consumo de agua externa, viajes de volquetes con lodos. |
| Costos de mantenimiento y operación | Mantenimiento general, pago a personal. |
| Costo de control de calidad | Salario del personal de laboratorio, costo de análisis. |

El resultado de los costos totales se calculó utilizando la ecuación 4.29.

$$Cost_T = Cost_P + Cost_{MyO} + Cost_{CdC} + P_{Pl} \quad \text{Ec. 4.29}$$

Donde $Cost_T$: costos totales (\$), $Cost_P$: sumatoria de los costos de producción (\$), $Cost_{MyO}$: sumatoria de los costos de mantenimiento y operación (\$), $Cost_{CdC}$: sumatoria de los costos de control de calidad (\$) y P_{Pl} : sumatoria de las inversiones planificadas (\$).

4.7.1.2. Cálculo de ingresos

Los ingresos totales se igualaron al ahorro generado por el uso de agua clarificada para lavado, la disminución de viajes de camiones con volquetes llenos de lodos, y la disminución en la periodicidad de mantenimiento de los equipos.

El ahorro generado por la disminución de viajes de volquetes para retirar los lodos a la salida del filtro rotativo, es igual al costo de la diferencia de los viajes antes y después de la reingeniería, como se estableció en la ecuación 4.30:

$$I_{Trans} = \Delta Trans * Cost_{Trans} \quad \text{Ec. 4.30}$$

Donde I_{Trans} : ahorro generado por la disminución de viajes de volquetes (\$), $\Delta Trans$: diferencia entre viajes de volquetes anteriores y actuales (#Viajes) y $Cost_{Trans}$: costo unitario de viaje (\$/viaje).

A su vez, el ahorro generado por uso de agua clarificada para el lavado, es igual al costo en el que se incurrió para bombear agua de pozo previo a la reingeniería, lo cual se estableció en la ecuación 4.31:

$$I_{Ener} = kWh * t_{zafra} * Costo_{kWh} \quad \text{Ec. 4.31}$$

Donde I_{Ener} es el ahorro generado por desuso de los pozos (\$), $Costo_{kWh}$ es costo para bombear agua de pozo (\$/kWh), t_{zafra} es el período de zafra (día) y kWh es la potencia de bombeo requerida (kWh).

Otra medida de ahorro importante es en los equipos donde se esperan la disminución de periodicidad de mantenimiento, como las chimeneas de las calderas, ventiladores inducidos y ductos. Estos ahorros fueron representados por la ecuación 4.32

$$I_{mant} = \sum(\Delta Mantenimiento * Cost_{mant})_{Equip} \quad \text{Ec. 4.32}$$

Donde I_{mant} es el ahorro generado por la disminución en el mantenimiento de los equipos asociados a las calderas (\$), $\Delta Mantenimiento_{equip}$ es la diferencia entre la periodicidad de mantenimiento de cada equipo antes de las mejoras implementadas y en la actualidad, $Cost_{mant-equip}$ es el costo que se genera por el mantenimiento de los equipos individualmente (\$/equipo).

De esta forma, los ingresos totales se calcularon con la ecuación 4.33:

$$I_T = I_{Trans} + I_{Ener} + I_{mant} \quad \text{Ec. 4.33}$$

Donde I_T : ingresos totales (\$), I_{Trans} : ahorro por la disminución de viajes de volquetes (\$), I_{Ener} : ahorro generado por desuso de pozos (\$) y I_{mant} es el ahorro generado por la disminución en el mantenimiento de los equipos asociados a las calderas (\$).

4.7.1.3. Depreciación antes de impuestos

La depreciación se realizó en toda la inversión inicial del rediseño; en este caso, el valor de esta inversión se depreció en su totalidad por lo que no se obtendrá ningún valor de salvamento ya que el sistema no será vendido. La depreciación fue restada para calcular las utilidades antes de impuestos (UAI) y se sumó en el cálculo de las utilidades después de impuestos (UDI) al finalizar el estudio económico. Utilizando la 3.1, se calculó la depreciación con el método de línea recta y como se establece en la tabla 3.3, las UAI se calcularon utilizando la ecuación 4.34:

$$UAI = I_T - Cost_T - D_t \quad \text{Ec. 4.34}$$

Donde UAI : utilidades antes de impuestos (\$), I_T : ingresos totales (\$), $Cost_T$: costos totales (\$), D_t : depreciación (\$).

4.7.1.4. Impuestos aplicados

El impuesto que se aplica a los proyectos en la compañía es el Impuesto sobre la Renta (IR), que corresponde al 30% de UAI . Por tanto, para calcular las utilidades después de los impuestos, se utilizó la 4.35

$$UDI = UAI - 0.3UAI \quad \text{Ec. 4.35}$$

Donde UDI : utilidad después de los impuestos (\$), UAI : utilidad antes de impuestos (\$).

4.7.1.5. Depreciación después de impuestos

Para calcular el FNE , se sumó la D_t a las UDI :

$$FNE = UDI + D_t \quad \text{Ec. 4.36}$$

Donde FNE es el Flujo Neto de Efectivo (\$), UDI : utilidad después de impuestos (\$), D_t : depreciación (\$).

4.7.2. Cálculo de Período de Recuperación

El período de recuperación se calculó con la ecuación 3.4 utilizando el FNE calculado a lo largo del tiempo de proyecto como se establece en el acápite 4.7.1.

4.7.3. Cálculo de Valor Presente Neto

Este método de análisis se determinó con la ecuación 3.5, utilizando el FNE calculado a lo largo de tiempo de proyecto como se establece en el acápite 4.7.1.

4.7.4. Cálculo de Relación Beneficio-Costo

Se utilizó la relación B/C como criterio de viabilidad; los beneficios y costos se especifican como:

- Beneficios: Ahorro en compra o extracción de agua para lavado de gases y ceniceros y ahorro de viajes de camiones volquetes con lodos.
- Costos: Inversión inicial (rediseño), costos de producción de agua limpia (insumos químicos, energía eléctrica empleada por los equipos, agua de reposición al sistema), costos de mantenimiento y operación.

Para el cálculo de este método de análisis se utilizó la ecuación 3.6 y el criterio expuesto en el acápite 3.13.6.

5. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. Caracterización fisicoquímica de afluentes y efluentes

Para analizar cada parámetro en su respectivo período de tiempo, se realizaron gráficos que representan el comportamiento individual en el periodo de tiempo de estudio, los cuales se muestran desde la figura 5.1 hasta figura 5.12. Para este objetivo, se siguió la metodología expuesta en el acápite 4.1, y se utilizaron la información expuesta en el Apéndice A. Cada gráfica cuenta consigo los límites de control establecidos por el ingenio, además del promedio según comportamiento.

5.1.1. Características físico-químicas en corrientes del FI-250 01

5.1.1.1. Agua homogeneizada

En la figura 5.1 se muestra el comportamiento de los SST en el escenario Z20-21, para el período del 18 de febrero hasta el 25 de marzo de 2021, cuyos datos fueron recolectados por el personal del ingenio. Estos gráficos de control para los SST en ambos escenarios consideran los límites de operación establecidos por el ingenio San Antonio en el acápite 3.12.1.

Desde el 18 al 27 de febrero se observó un comportamiento inestable en la concentración de SST, obteniéndose un pico bajo el 26 de febrero en donde se tiene una concentración de 0.31%; esta baja concentración puede relacionarse a la cantidad de cenizas presentes en las tolvas, la cual es baja si previamente se realizó un soplado de hollín en los accesorios de las calderas, y la ceniza resultante fue removida del circuito antes de tomar la medición.

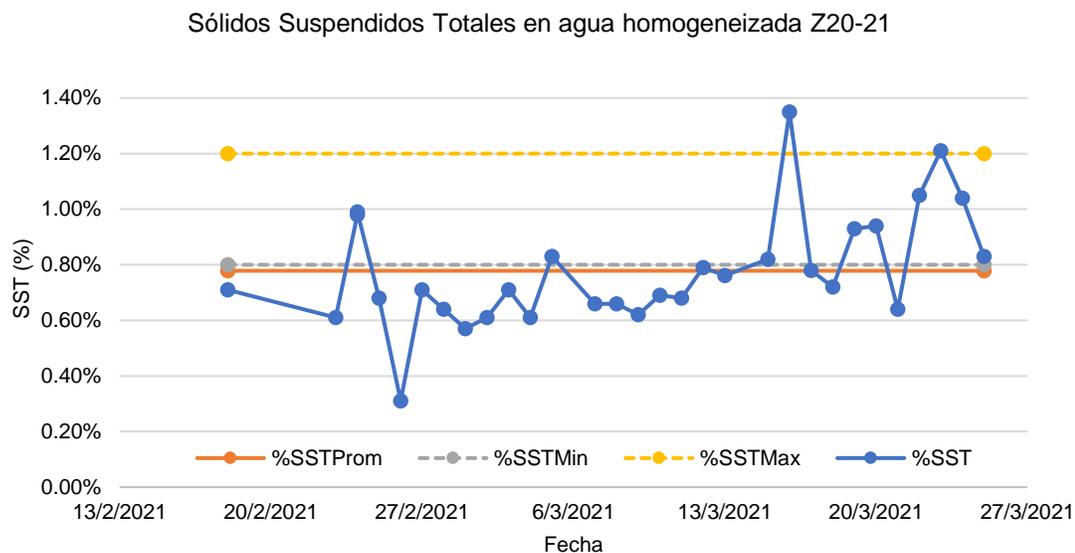


Figura 5.1. Comportamiento de SST en agua homogeneizada en Z20-21 desde el 18 de febrero al 25 de marzo de 2021

Del 28 de febrero al 14 de marzo, el comportamiento de la concentración fue estable, sin embargo, su magnitud promedió 0.68% SST, valor por debajo de los límites de operación establecidos. Este comportamiento se justifica en gran medida debido a que, para este período, no todos los sistemas de lavado de gases y cenizas convergían en la canaleta que se encuentra aguas arriba de la planta de tratamiento de agua con cenizas.

Al no converger agua del *scrubber* de HPB2 y cuatro tolvas, la concentración de SST disminuye puesto que el caudal de agua de lavado era siempre el mismo, haciendo que la cantidad de sólidos se saliera de los límites de operación establecidos para la planta.

Desde el 15 hasta el 25 de marzo se observó inestabilidad en la concentración de SST; se obtuvieron picos altos principalmente el 16 y 23 de marzo de este período. Este comportamiento se vio afectado por el soplado de hollín, el cual, al realizarse, desprende de las superficies de transferencia de calor grandes cantidades de cenizas adheridas; estas cenizas son recolectadas por las tolvas, las cuales al lavarse se adhieren contenidos altos de SST al agua. Como promedio global se registraron 0.78% SST, encontrándose por debajo del límite inferior establecido.

La figura 5.2 muestra el comportamiento registrado para la concentración de SST durante la Z21-22, desde el 20 de diciembre de 2021 hasta el 8 de febrero de 2022. Estos datos fueron medidos *in situ* contando con el apoyo de personal del laboratorio de agua de procesos del ingenio.

Para este período se observa mayor tendencia a mantenerse en los límites establecidos, a diferencia del período previo. Del 20 de diciembre de 2021 al 22

de enero de 2022 se observó en mayor medida esta tendencia; sin embargo, se tienen picos arriba de 1.2%SST, lo cual es atribuible al soplado de hollín que se realiza en el ingenio, el cual es influyente si la muestra se toma momentos luego de realizarse.

Desde el 11 al 16 de enero y del 23 de enero al 8 de febrero, se observan concentraciones de SST (%) un poco debajo del límite inferior establecido. Estas desviaciones son atribuibles a posibles aumentos del caudal de agua utilizada para lavar las tolvas, disminuyendo la concentración de SST, o a una combustión más eficiente en la biomasa utilizada, obteniéndose menor cantidad de cenizas.

El promedio de %SST registrado para este período fue de 0.84%SST, encontrándose dentro de los límites establecidos por el ingenio.

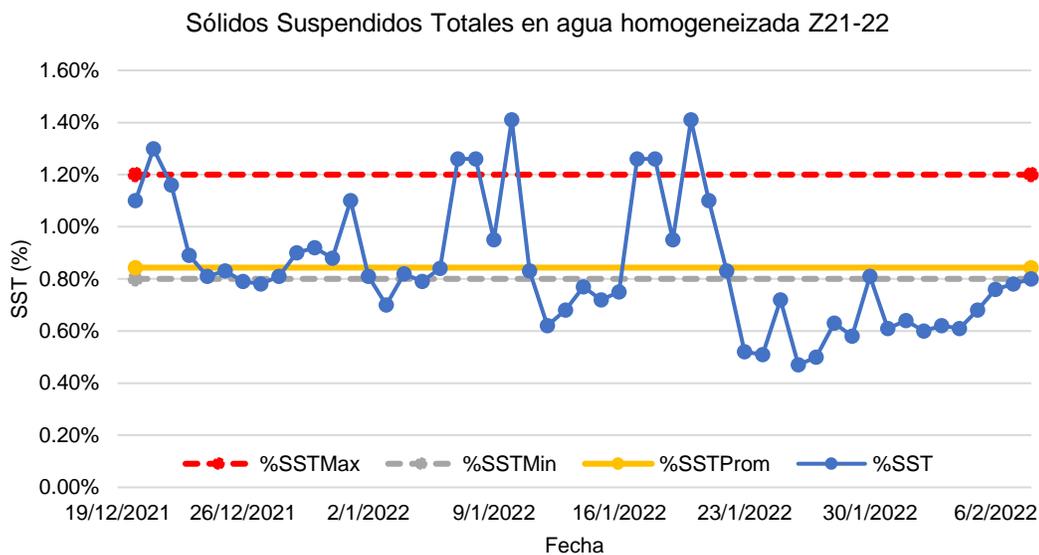


Figura 5.2. Comportamiento de SST en agua homogeneizada en Z21-22 desde el 20 de diciembre 2021 al 8 de febrero de 2022

5.1.1.2. Corriente de lodos concentrados

El comportamiento de los sólidos en la corriente #3 (*Underflow* del clarificador) se visualiza de la figura 5.3 y figura 5.4. La recirculación logra aumentar la eficiencia general del proceso, no obstante, con el fin de evitar la sobresaturación en el filtro, y que el nivel del lecho de lodos en el clarificador disminuya, el porcentaje de sólidos no debe ser ni menor de 2% o mayor que 4%.

En la figura 5.3 se observó el comportamiento para los SST en la corriente *UnderFlow*, utilizando como límite de operación establecido por el ingenio un

rango de 2% a 4% SST. El comportamiento inestable de estas concentraciones a lo largo del período de 18 de febrero al 25 de marzo de 2021 se dio debido a dos causas: ausencia de un sistema de variadores que permitieran controlar el flujo que el sistema de bombeo PU-276 entregaba, y los diámetros de succión y descarga, los cuales tenían el mismo diámetro de 4". Para este período, se obtuvo una concentración promedio de 7.23% SST, con un máximo de 16.90% SST.

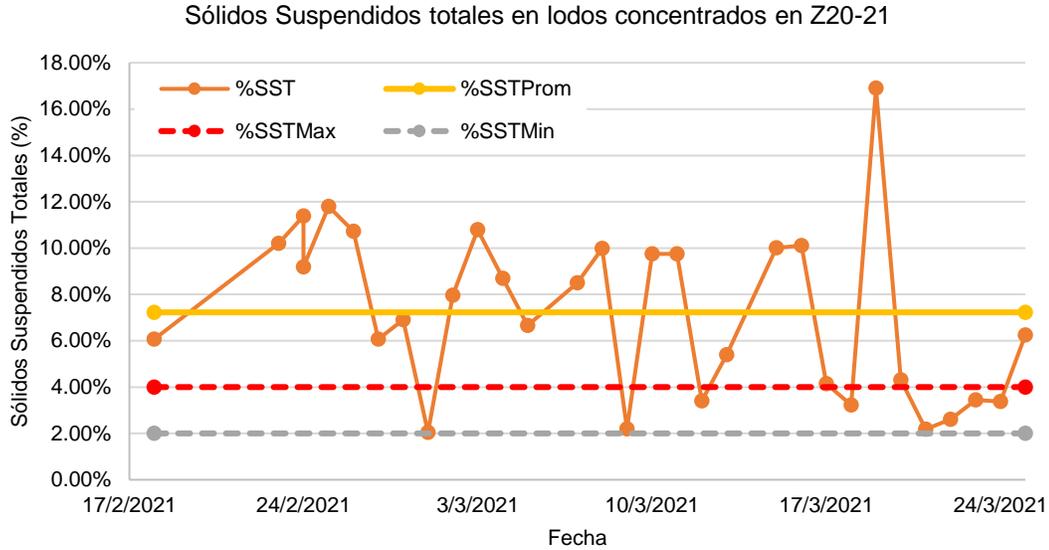


Figura 5.3. Comportamiento de SST en lodos concentrados de Z20-21

En la figura 5.4 se observó el comportamiento para los SST en la corriente *UnderFlow* durante el período del 20 de diciembre de 2021 al 8 de febrero de 2022. Se observó estabilidad en el comportamiento de la concentración de los SST durante casi todo el período, con anomalías los días 20, 21 y 23 de diciembre de 2021; 6 y 31 de enero de 2022, correspondiendo a picos altos de concentración. Los días 26 de enero y 6 de febrero de 2022 se tuvieron picos bajos en la concentración.

Estos picos son atribuibles a causas similares a los picos en figura 5.2, en donde toma un papel importante el momento en que se toma la muestra, ya que el agua puede estar con mayor o menor cantidad de SST en dependencia de los sopladors de hollín en las HPB o la cantidad y característica del bagazo que es alimentado al sistema de generación de vapor.

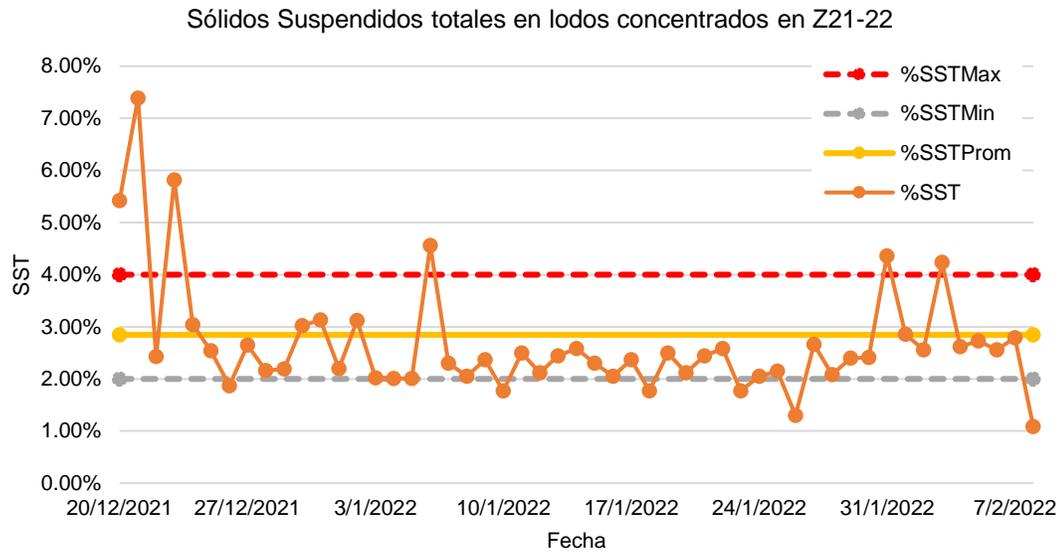


Figura 5.4. Comportamiento de SST en lodos concentrados de zafra Z21-22

5.1.1.3. Lodos a la salida del filtro rotativo

Para las gráficas de control del contenido de humedad en la salida del filtro rotativo, se utilizó como límite máximo 80% de humedad, establecido por el ingenio San Antonio. En la figura 5.5 se observa el comportamiento del contenido de humedad en los lodos a la salida del filtro rotativo durante el período del 18 de febrero al 25 de marzo de 2021, correspondiente a Z20-21. La tendencia de este comportamiento promedia 81.17% de humedad, superando el límite establecido.

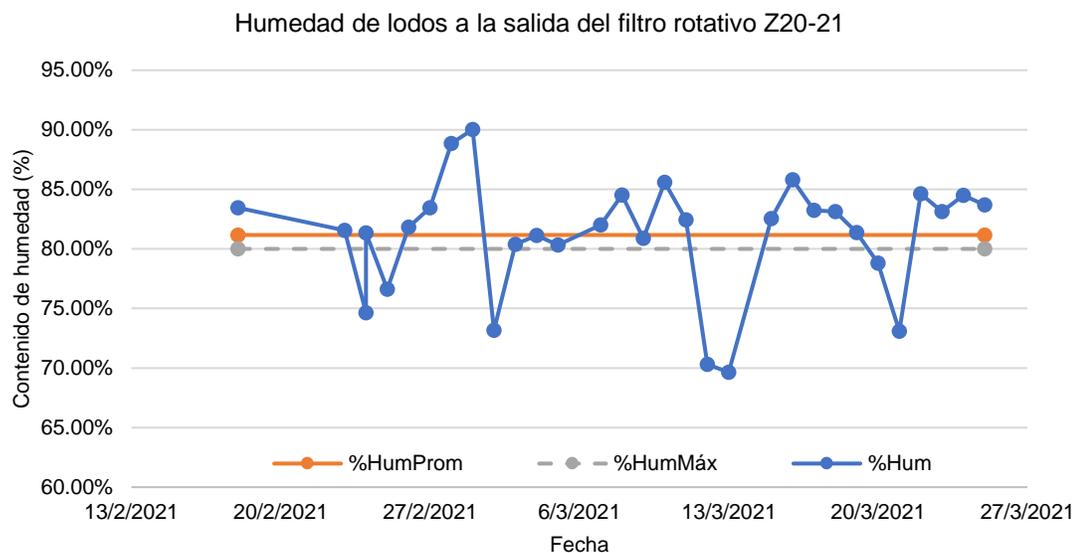


Figura 5.5. Comportamiento del contenido de humedad en los lodos a la salida del sistema en Z20-21 desde el 18 de febrero al 25 de marzo de 2021

El comportamiento inestable de la humedad es asignable a falta de control en las dosificaciones de floculante. Las dosificaciones ineficientes de floculante influyen en los picos tanto altos como bajos, ya que, al no contar con un registro de la cantidad necesaria de floculante en dependencia de la concentración de sólidos suspendidos totales en el agua a tratar, la dosis de floculante no se ajustó, por lo que pudo presentarse una infra dosificación (picos altos), como una sobre dosificación (picos bajos).

Otra causa asignable a los picos altos es el tiempo de retención al que el filtro rotativo se ajustó; si el tiempo de retención es muy corto, el equipo no logra filtrar adecuadamente, por lo que gran parte de esta humedad salía junto a los lodos.

El contenido de humedad incidió en la cantidad de viajes realizados para transportar la masa de lodos hacia su disposición final, promediando un total de 96 viajes por día.

La figura 5.6 muestra los resultados del comportamiento del contenido de humedad en los lodos para el mes de enero de 2022, correspondiente a Z21-22. El comportamiento para este período presentó mayor estabilidad que el expuesto en la figura 5.5. Obteniéndose un promedio de 76.05%, contenido de humedad menor al máximo establecido.

El comportamiento de la humedad en este período se encuentra más amortiguado, atribuible a la mejora realizada en el filtro rotativo, a como se mencionó en el acápite 3.12.2.1. Sin embargo, se tienen altos picos los días 18, 19, 23 y 24 de enero. Al igual que en el período Z20-21, este comportamiento es

justificable a través de la dosificación de floculante, la cual, a pesar de estar regulada, genera concentraciones residuales en el sistema.

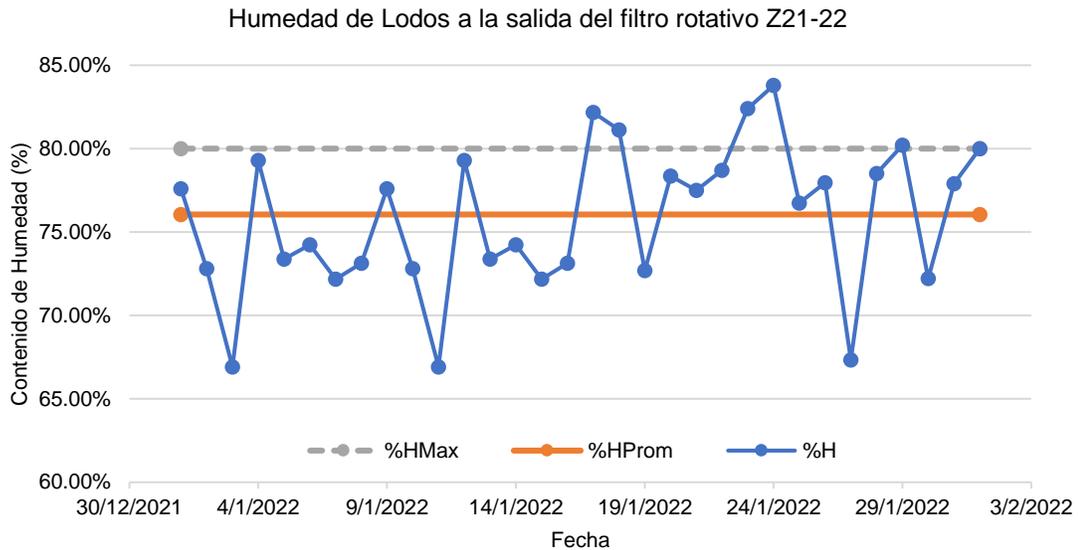


Figura 5.6. Comportamiento del contenido de humedad en los lodos a la salida del sistema en Z21-22 desde el 1 de enero al 1 de febrero de 2022

Actualmente, no se cuentan con equipos o metodologías en el ingenio que permitan medir la concentración residual del N-7128; esto provoca el riesgo de desviarse de la dosis óptima de floculante, lo que puede provocar ruptura de los *flocs* formados previamente, evitando que el filtro expulse lodos deshidratados

No obstante, el ajuste de la dosis de floculante y la reingeniería en el sistema de tratamiento permitieron que la humedad promedio disminuyera respecto al período pasado, por ende, la cantidad de viajes realizados por camiones recolectores de lodos al día disminuyó de 96 a 30 viajes, generando beneficios para el ingenio.

Las variables que manipulan el comportamiento de la humedad fueron el tiempo de retención de los lodos en el filtro rotativo y la dosis de floculante en la corriente. Debido a la incertidumbre sobre la concentración de floculante residual en el sistema, la dosificación realizada podría ser superior a lo requerido y concentrarse en los lodos transportados, contribuyendo a la deshidratación de estos.

5.1.1.4. Agua filtrada

No se cuentan con datos históricos del contenido de SST para Z20-21 para la corriente de agua filtrada; a su vez, tampoco se realizó medición de este contenido

para Z21-22. Sin embargo, la tabla A.4 en Apéndice A, presenta promedios de los resultados de SST obtenidos por medio de balances de materia.

En esta tabla se evidencia una disminución en concentración de 0.8% SST a 0.2% SST. Esta variación es atribuida a una dosificación optimizada de floculante y al aumento en la eficiencia del filtro rotativo, los cuales se reflejan en el aumento del caudal de lodos en base seca que se dirigen hacia los volquetes.

Tales discusiones se abordan a mayor profundidad en los acápite 5.1.1.3, referenciado a porcentaje de humedad en lodos hacia volquetes; acápite 5.2.2 de caudales medidos; acápite 5.3 de determinación de dosis óptima de floculante y acápite 5.4 de eficiencia de remoción de la planta.

5.1.2. Características físico-químicas en corrientes del CL-250

Para Z20-21 no se contó con muchos datos correspondientes a los parámetros medidos en el agua clarificada. Por tanto, la comparación entre ambas zafra se realizó utilizando datos promediados de Z20-21 y un grupo de datos medidos durante Z21-22 con la frecuencia especificada en el acápite 4.1.

5.1.2.1. Calidad de agua clarificada

Según la tabla A.4, para Z20-21 se obtuvo una concentración de SST promedio de 46.18 ppm en el agua clarificada. Este resultado indicó una eficiencia de remoción de 99.53% según el acápite 5.4; sin embargo, esta concentración no cumplió con el parámetro de calidad de agua menor a 25 ppm de SST esperado por el ingenio.

La figura 5.7 muestra el comportamiento registrado de la concentración de SST en el agua clarificada para Z21-22, en el período del 7 de enero al 6 de marzo de 2022. El promedio registrado para esta concentración fue de 17.64 ppm, 28.54 ppm menos que el promedio de la zafra anterior, cumpliendo con los estándares de calidad establecidos por el ingenio.

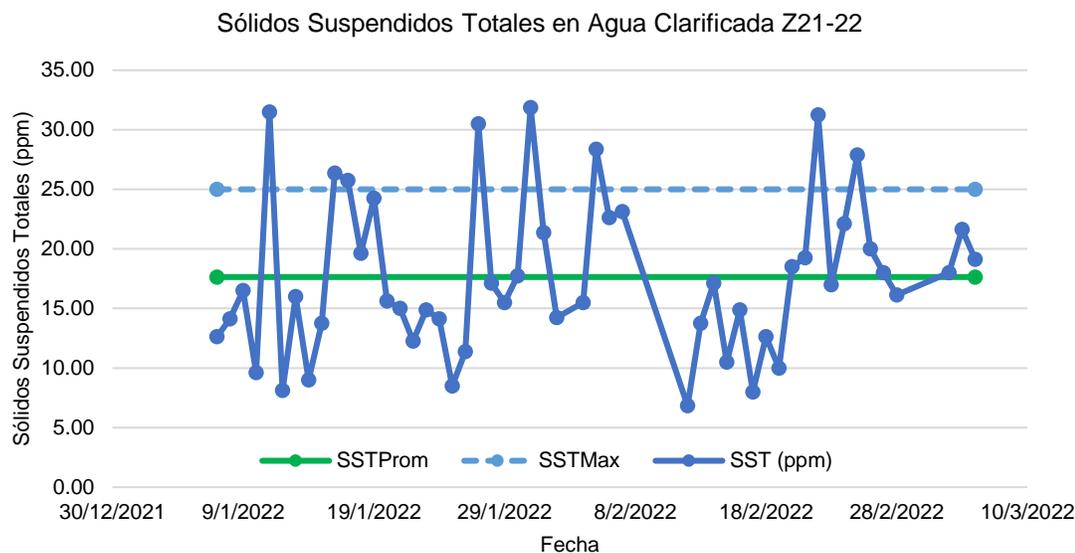


Figura 5.7. Comportamiento del contenido de sólidos suspendidos totales en agua clarificada en Z21-22 desde el 6 de enero al 12 de febrero de 2022

La concentración de sólidos en el período analizado presenta un comportamiento relativamente estable; sin embargo, presenta picos pronunciados, obteniéndose un valor máximo de 31.88 ppm. A pesar de obtenerse una concentración admisible según criterios de calidad y determinarse concentraciones óptimas de floculante para distintas concentraciones de SST, a como se explica en el acápite 5.3, este comportamiento evidencia que los métodos de dosificación del N-7128 pueden mejorarse.

La calidad del agua clarificada con respecto a los SST tuvo gran mejoría en el segundo escenario de estudio; se redujo de 46.18 ppm en Z20-21, acorde con la tabla A.4, a un promedio de 17.64 ppm, logrando cumplir la meta de 25 ppm como máxima concentración aceptable para la preservación de la integridad mecánica de los equipos de recolección, transporte, y lavado de cenizas.

En la figura 5.8 se observa el comportamiento de los SST para el agua homogeneizada y agua clarificada durante el 6 de enero al 12 de febrero de 2022, con el objetivo de analizar el tipo de relación entre ambos parámetros.

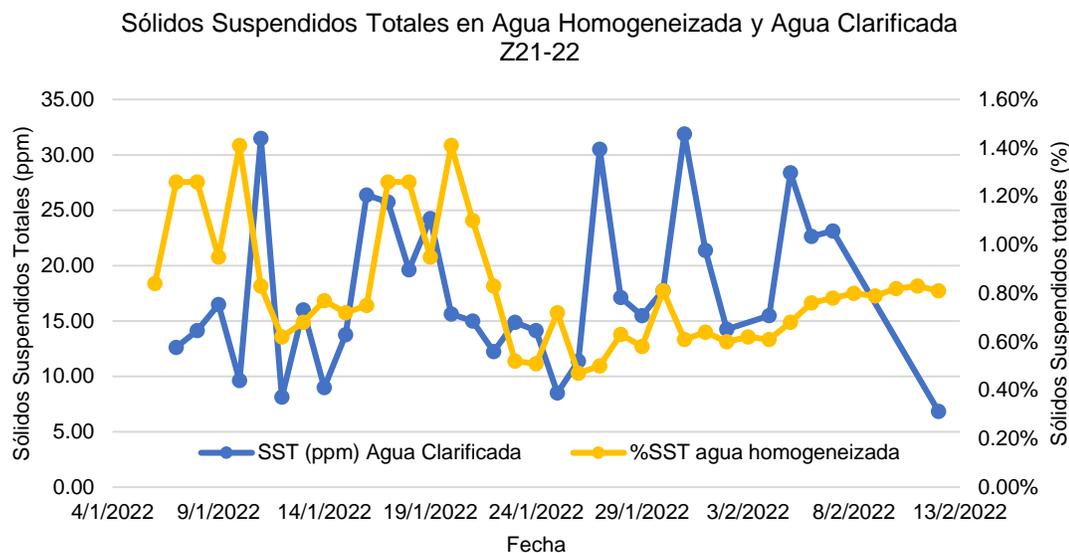


Figura 5.8. Relación entre sólidos suspendidos totales en agua homogeneizada y en agua clarificada durante Z21-22

Se observó que cuando la carga de SST entrantes en el agua homogeneizada es menor al límite establecido de 0.8% SST (disminuye), la cantidad de SST en el agua clarificada tiende a aumentar, evitando que se cumpla el requerimiento de 25 ppm en ciertas ocasiones.

Dicha conducta está relacionada con la dosificación de floculante, la cual es realizada de forma manual, lo que implica mayor susceptibilidad a errores en relación a utilizar métodos automatizados. La dosificación óptima de floculante se discute en el acápite 5.3

5.1.2.2. Índice de Ryznar

Según la tabla A.4 en Z20-21 el índice de IRz promedió 5.61, correspondiente a agua con tendencia ligeramente incrustante. A como se establece en el acápite 3.3.6, los parámetros que influyen en el comportamiento de IRz son la alcalinidad, dureza, sólidos disueltos totales, temperatura, y pH.

En la figura 5.9 se muestra una gráfica de comportamiento entre la alcalinidad, dureza total y STD, donde se presentaron las siguientes características:

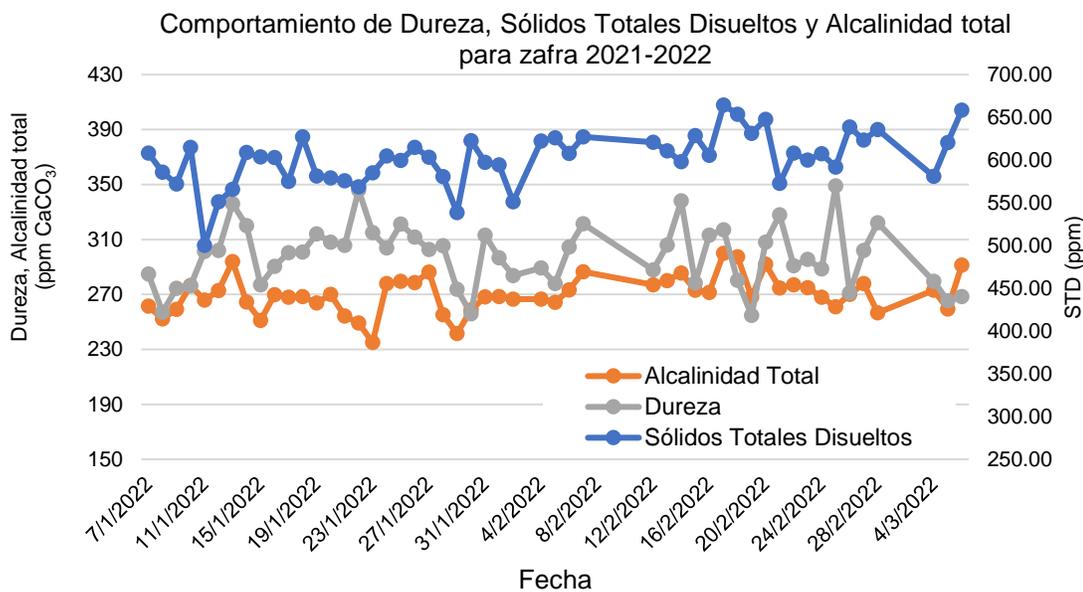


Figura 5.9. Comportamiento de alcalinidad, dureza y sólidos disueltos totales en el agua clarificada para Z21-22

- La alcalinidad y la dureza tiene un comportamiento bastante similar; la concentración de ambos crece y decrece de forma directa, a excepción de días particulares como fue el periodo del 23 de enero al 27 de enero, donde la dureza presentó comportamiento ascendente, mientras que la alcalinidad era menor. Esto puede asociarse a una disminución en la presencia de hidróxidos en el agua asociado con dosificaciones irregulares de floculante, a como a la adición de agua de reposición de las corrientes T con composición variable.
- El rango de alcalinidad total se encuentra entre 235 ppm CaCO_3 y 300 ppm CaCO_3 , con un promedio de 270 ppm CaCO_3 ; la concentración de dureza fluctúa entre 254.75 ppm CaCO_3 y 349 ppm CaCO_3 , con un promedio de 298.49 ppm CaCO_3 ; finalmente, los límites de los STD se mantuvieron entre 500.43 ppm y 664.4 ppm, promediando una concentración de 602 ppm.
- El comportamiento de los STD es el más cambiante respecto a los demás factores, con una diferencia de 164 unidades entre límite inferior y límite superior.

La figura 5.10 describe el comportamiento del pH respecto al tiempo durante Z21-22. Sus límites operacionales fueron desde 7.23 hasta 8.06; con un promedio de 7.72, el pH se mantiene bastante estable con el tiempo, teniendo una tendencia básica. No obstante, entre el 7 de enero al 28 de enero se observa una mayor fluctuación en el pH que a la fecha posterior al 28, y es donde se obtuvieron los

valores más bajos de todo el tiempo de estudio. Esta variable es la que tiene mayor incidencia en el comportamiento de IRz.

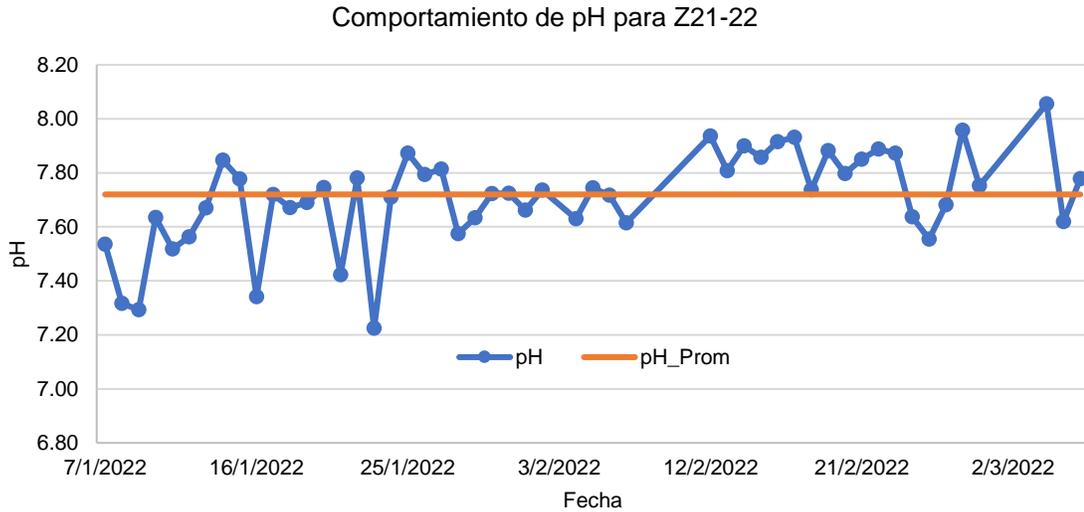


Figura 5.10. Comportamiento de pH en el agua clarificada para Z21-22

También se tiene el comportamiento de la temperatura durante Z21-22 en la figura 5.11. Se aprecia que, en el período del 7 de enero al 28 de enero, la temperatura tuvo sus valores más bajos. El promedio de operación de la variable es de 114.51 °F, con valor mínimo de 107.33 °F y valor máximo de 121.98 °F. La temperatura está relacionada directamente con el proceso de combustión del bagazo.

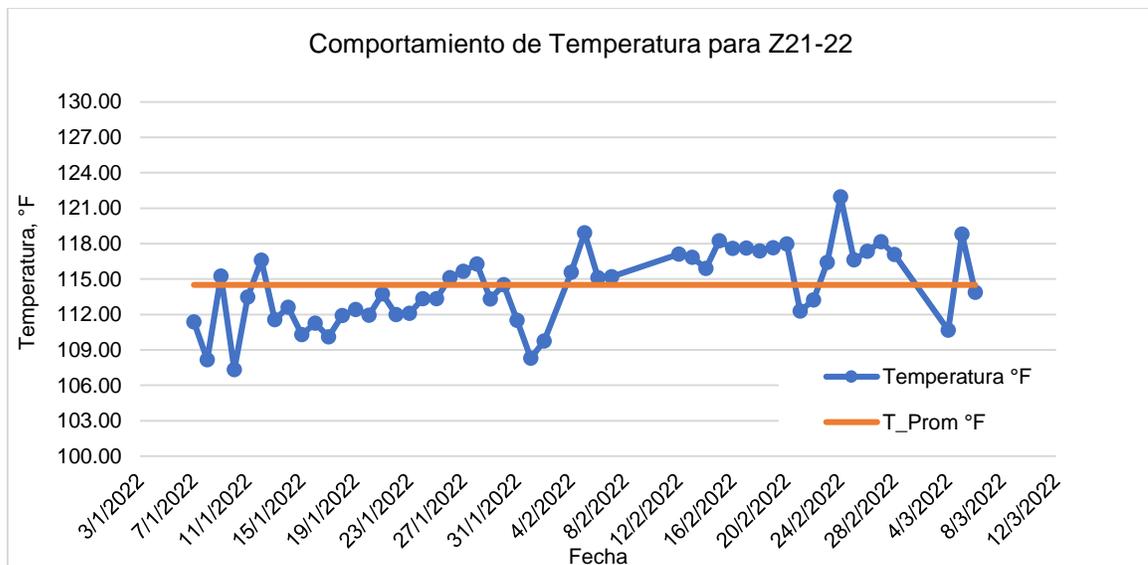


Figura 5.11. Comportamiento de temperatura en el agua clarificada para Z21-22

Durante Z21-22, según muestra la figura 5.12, el IRz aumentó levemente su valor a un promedio de 5.63. El comportamiento expuesto en el gráfico demuestra que el IRz se comportó de forma estable del 7 de enero al 27 de enero de 2022; sin embargo, el comportamiento del IRz se desplazó hacia un valor promedio menor desde el 28 de enero hasta el 6 de marzo de 2022, tendiendo en mayor medida a la incrustación. Dentro de las causas asignables se tienen la temperatura, la cual se observa en tuvo un ligero aumento a partir del 28 de enero, ocasionando una mayor vaporización del agua y por ende una disminución en el promedio de IRz

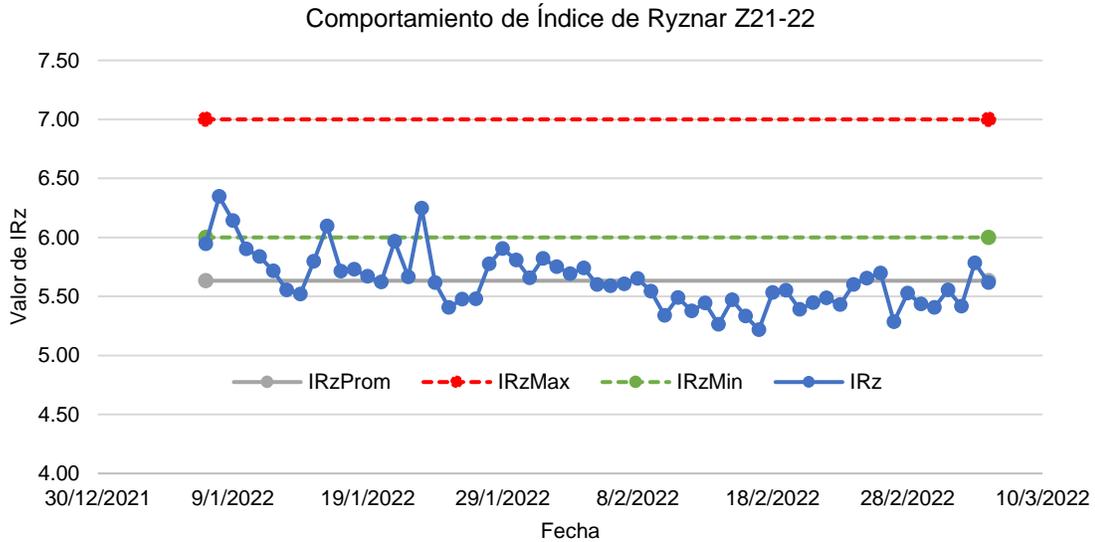


Figura 5.12. Comportamiento del índice de Ryznar para Z21-22

Con fines comparativos, se realizó un análisis aislado de agua homogeneizada donde se determinaron los parámetros medidos en el agua clarificada para Z21-22, los cuáles se muestran en la tabla 5.1

Tabla 5.1 Características del agua homogeneizada para Z21-22

| pH | Dureza ppmCaCO ₃ | T°F | STD ppm | Alcalinidad ppmCaCO ₃ | IRz | SST ppm |
|------|--------------------------------|-----|------------|-------------------------------------|------|------------|
| 7.99 | 360 | 104 | 488 | 258 | 5.42 | 9135 |

Comparando los parámetros de calidad del agua homogeneizada contra los del agua clarificada, se aprecia una disminución del pH de 0.27 y dureza de 61.51 ppm. A su vez, se notó un aumento en STD de 114.07 ppm, atribuible a la dosis de floculante, 10.51°F y 11.95 ppm en alcalinidad total luego del tratamiento del agua homogeneizada. Como resultado, el IRz en el agua clarificada es mayor que en el agua homogeneizada, por ende, con menor carácter incrustante.

5.2. Determinación de caudales en las corrientes

5.2.1. Caudales medidos

En la tabla 5.2 se aprecia un aumento de caudal de 232 m³/h en la corriente de agua homogeneizada entre la Z20-21 y Z21-22, esto gracias a la reingeniería realizada (Ver acápite 3.12.2.1). Por otro lado, debido a la carencia de caudales registrados para la corriente de lodos concentrados durante Z20-21, se consideró un caudal constante de 105 m³/h. Esta consideración se realizó tomando como base las siguientes condiciones:

- Durante Z20-21, el sistema de bombeo PU-276, operó a velocidad constante de 1741 rpm, manteniendo por ende un caudal constante.
- Los caudales de reposición T₁ y T₂ son mutuamente excluyentes y no operan de forma continua. Cada uno de ellos alcanza un caudal máximo de 243 m³/h y 316 m³/h, sin embargo, el caudal utilizado está en dependencia de la cantidad faltante para alcanzar un suministro de 1020 m³/h hacia el sistema de lavado.

Tabla 5.2. Caudales volumétricos medidos de la planta de tratamiento de agua con cenizas (Z20-21 vs Z21-22)

| Corriente ¹ | Punto de muestreo | Q _T (m ³ /h) Z 20-21 | Q _T (m ³ /h) Z 21-22 |
|-------------------------|-------------------|---|---|
| Agua homogeneizada | 1 | 788 | 1020.00 |
| Lodos concentrados (UF) | 3 | 105.00 | 105.00 |
| Agua de reposición 1 | T ₁ | - | 243.00 |
| Agua de reposición 2 | T ₂ | - | 316.00 |
| Agua de lavado 1 | S ₁ | - | 345.00 |
| Agua de lavado 2 | S ₂ | - | 680.00 |
| Agua de lavado 3 | S ₃ | Fuera de servicio | |

¹ El caudal total de cada punto fue medido con apoyo del caudalímetro ultrasónico PT900 ±1%.

No se contó con registros de los caudales del agua de reposición T₁ ni T₂, ni con el caudal de rebozo ni agua de lavado utilizado para Z20-21.

5.2.2. Caudales calculados

Para la determinación del caudal de lodos húmedos, se siguió la metodología del acápite 4.4.2. La masa promedio de lodos es de 11.94 toneladas, obtenida en un promedio de tiempo de 27.33 minutos; el cociente de estos valores resultó en el caudal de lodos dirigido hacia los volquetes.

La tabla 5.3 presenta el resumen del caudal total calculado de cada punto del proceso, al igual que el caudal de lodos según el porcentaje de SST promedio presentado en la tabla A.4.

Debido al aumento del volumen de agua homogeneizada, se incrementó el caudal de lodos hacia volquetes en un promedio de 12.83 m³/h, y de esta diferencia, 3.75 m³/h son pertenecientes a lodos en base seca. Si bien el mayor flujo obtenido es debido al mayor afluente procesado, a la remoción de sólidos también contribuyen las modificaciones realizadas en el filtro rotativo y en el clarificador. Así mismo, se recuperan 219.17 m³/h más de agua clarificada respecto a la Z20-21

El rebozo del tanque de agua clarificada se debe a problemas de regulación de llenado del tanque. En las ocasiones donde se envíe más caudal del requerido para la limpieza, el rebozo del tanque puede alcanzar hasta los 351.8 m³/h.

Tabla 5.3. Caudales volumétricos de la planta de tratamiento de agua con cenizas (Z20-21 vs Z21-22) calculados por medio de balances de materia

| Corriente | Punto de muestreo | Q _T (m ³ /h) Z 20-21 | Q _T (m ³ /h) Z 21-22 | Q _{LBS} ³ (m ³ /h) Z 20-21 | Q _{LBS} (m ³ /h) Z 21-22 |
|---------------------------------|-------------------|---|---|--|---|
| Agua homogeneizada | 1 | - | - | 6.17 | 8.6 |
| Lodos concentrados (UF) | 3 | - | - | 7.59 | 2.99 |
| Agua de filtro al clarificador | 2 | 879.63 | 1098.80 | 7.63 | 3.01 |
| Agua clarificada (OF) | 4 | 774.63 | 993.80 | 0.036 | 0.018 |
| Lodos salida de Filtro Rotativo | 5 | 13.37 | 26.20 | 2.52 | 6.27 |
| Rebozo de tanque clarificado | Rbz | - | 351.80 | - | - |

5.3. Determinación de dosis óptima de floculante

5.3.1. Cálculo de carga superficial

Siguiendo la ecuación 4.21, se determinó la carga superficial para el clarificador en Z21-22. Los datos utilizados y resultados obtenidos se muestran en la tabla 5.4

Tabla 5.4 Resultados de cálculo de carga superficial para Z21-22

| Parámetro | Valor | Unidad |
|-----------|-------------|----------------|
| A_{Sup} | 50.27 | m ² |
| CS | 0.61 | cm/s |
| V_{ISA} | 1.83 – 3.66 | cm/s |

Acorde a los resultados, la carga superficial es de 0.61 cm/s, lo que significa que, acorde a los criterios del ingenio, la velocidad de sedimentación debe encontrarse en el rango de 1.83 a 3.66 cm/s para que las partículas logren sedimentar. Durante las pruebas de cilindro, no se igualó tal rango, pero se comprobó que la sedimentación se efectúa si se alcanza o supera la carga superficial.

5.3.2. Pruebas de cilindro

No se logró observar una sedimentación de partículas apreciable para las probetas #0, debido a la gran carga de SST presentes en la muestra, lo que evitó poder registrar alturas de descenso de la partícula, por tanto, no se determinó la velocidad de sedimentación para condiciones sin dosificación de floculante.

Las pruebas de cilindros se realizaron a 1 minuto y 30 segundos, marcando en la probeta la altura de descenso de la partícula cada 10 segundos. En la tabla 5.4 se exponen los resultados de las pruebas de cilindros realizadas a las distintas muestras de agua homogeneizada; estos resultados incluyen la determinación de la velocidad de sedimentación y concentración de SST a 15 minutos.

La velocidad de sedimentación donde cada uno de los escenarios vence la carga superficial, o tiene el máximo acercamiento a la misma, se dio entre los 20 segundos y 50 segundos, a excepción del escenario de carga de 0.83% y 1.10% SST donde la carga superficial se superó a los 10 segundos al adicionarse 2 ppm de floculante debido a la mayor interacción de los sólidos con el polímero.

Tabla 5.5. Velocidad de sedimentación y concentración de SST final para diferentes concentraciones de floculante y carga de SST en agua homogeneizada

| %SST ppmFloc | 0.67% | | 0.83% | | 1.10% | | 1.16% | |
|-----------------|--------------|--------------------------|--------------|--------------------------|--------------|--------------------------|--------------|--------------------------|
| | SST (ppm) | V _s (cm/s) |
| 0.5 | 76.00 | 0.42 | 68 | 0.4 | 65 | 0.44 | 94 | 0.43 |
| 1 | 51.00 | 0.61 | 41 | 0.69 | 39 | 0.75 | 86 | 0.6 |
| 1.5 | 23.00 | 0.55 | 25 | 0.68 | 29 | 0.79 | 29 | 0.65 |
| 2 | 29.00 | 0.42 | 26 | 0.72 | 24 | 0.83 | 61 | 0.68 |

Estos valores se proyectaron en dos gráficas distintas: la figura 5.13 que representa el comportamiento de la velocidad de sedimentación respecto a la dosificación, y la figura 5.14 que demuestra si, pasado los quince minutos, la floculación permite que la concentración de SST sea menor a 25 ppm, parámetro de calidad dado por el Ingenio San Antonio. Según el resumen de ambas gráficas, se explica lo siguiente:

- En la figura 5.13, se observa que a 1 ppm de floculante dosificado a las muestras con concentraciones de 0.83% SST, 1.10% SST, 1.16% SST, las velocidades de sedimentación resultantes igualan o sobrepasan a la carga superficial. Sin embargo, según la Figura 5.14, estas muestras alcanzan valores menores a 25 ppm de SST hasta que se dosificaron 1.5 ppm de floculante, concentración en la cual se mantuvieron velocidades de sedimentación superiores a la carga superficial. Por tanto, la dosis óptima para estas muestras es de 1.5 ppm de floculante.
- La velocidad de sedimentación para la muestra con carga de 0.67% SST no supera a los 0.61 cm/s de la carga superficial al dosificar 1.5 ppm de floculante, a diferencia de las otras muestras. Esta velocidad de sedimentación se alcanza con la adición de 1 ppm, sin embargo, se logran concentraciones menores a 25 ppm a partir de la adición de 1.5 ppm de floculante. Considerando que el tiempo de retención en el clarificador es de 15 min, resulta viable utilizar una concentración de 1.5 ppm de floculante para esta muestra.
- La muestra con carga de 1.16% SST igualó la carga superficial a 1 ppm de floculante. Al realizar la prueba a 1.5 ppm de floculante, la carga superficial supera la velocidad; sin embargo, la concentración de SST fue menor a 25 ppm, por lo que esta dosis resulta adecuada a la concentración de %SST

especificada. Se observó que, a 2 ppm de floculante, la concentración de %SST tiende a aumentar, esto ocasionado por la dosificación alta de floculante a estas condiciones, que propician efectos de repulsión entre nubes electrónicas del floculante debido al aumento de carga eléctrica del mismo tipo.

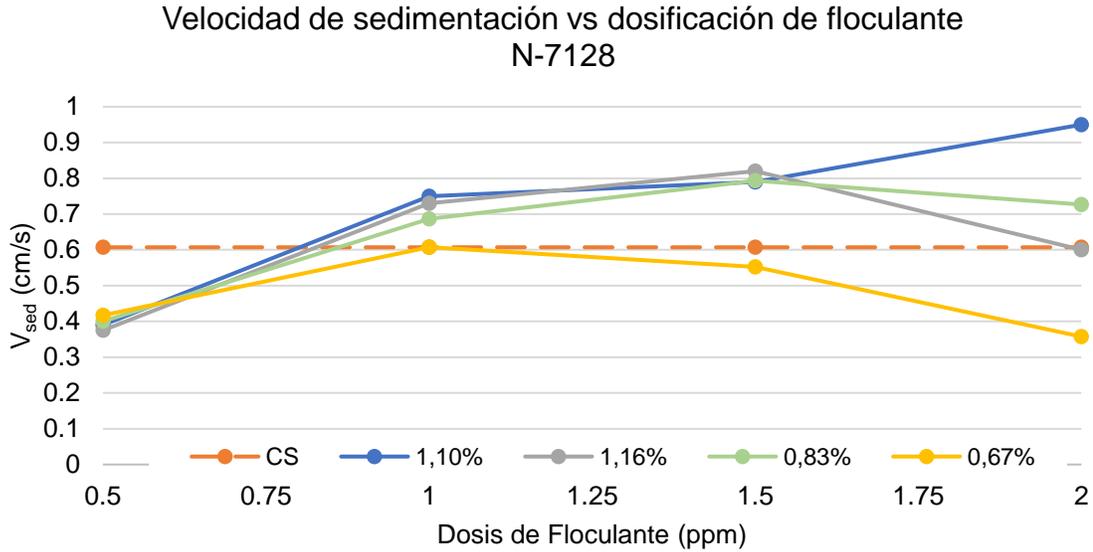


Figura 5.13. Comportamiento de la sedimentación respecto a inyección de floculante para distintas concentraciones de SST.

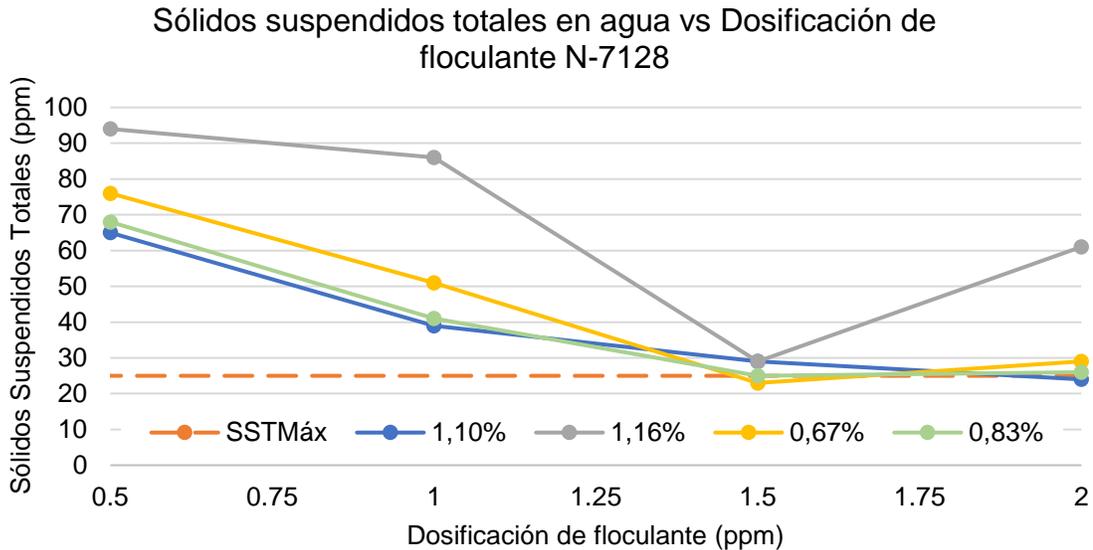


Figura 5.14. Concentración final de SST bajo distintas dosificaciones de floculante a distintas cargas de SST en agua homogeneizada.

Los resultados de las pruebas de cilindro a escala de laboratorio, indican que la dosificación óptima de floculante es de 1.5 ppm para el rango de concentraciones analizadas. A pesar de ello, al replicar el resultado a escala industrial, se observó que, dosificando 1 ppm de floculante en el sistema, se obtuvieron resultados aceptables según criterios de calidad establecidos por la empresa.

Este fenómeno se asocia a distintas causas:

- El paso de la corriente a través del filtro rotativo de doble etapa, que disminuye la cantidad de sólidos que entran directamente al clarificador.
- La concentración residual de floculante que se mantiene en el proceso, y es aprovechada por el sistema a través de la recirculación y filtrado de la corriente lodos concentrados. Este residual permite mayor aglomeración de sólidos tanto en el filtro rotativo como en el clarificador.
- La inyección de floculante en las corrientes #2 y #3, que se utilizan situacionalmente como apoyo a la dosificación en la corriente de agua homogeneizada.

Si los resultados operativos con dosificaciones de floculante a 1 ppm no resultaran efectivos, podría utilizarse la concentración de floculante a 1.5 ppm siendo necesario ajustar condiciones del proceso:

- Aumentar la capacidad de bombeo: Actualmente, el ingenio San Antonio cuenta con una bomba de tornillo sin fin, con una carga nominal de 0.9 m³/h; si esta carga aumenta, existe la posibilidad de dañar la bomba. Como alternativa, podría adherirse una segunda bomba auxiliar con la finalidad de aumentar la carga entregada por el sistema de bombeo. Las consecuencias incidirían en el aumento de consumo de floculante, que se succiona del tanque de dilución, aumentando costos.
- Aumentar la cantidad de floculante en el tanque de maduración: Para esta alternativa debe de tomarse en cuenta la viscosidad resultante, puesto que equipos como bombas y mezcladores son utilizados; a medida que la viscosidad aumenta, el tipo de equipo rotativo que se necesite tiende a cambiar por la naturaleza del fluido.

Finalmente, se evidenció a través de la tabla 5.5, figura 5.13 y figura 5.14 que no es necesario que la velocidad de sedimentación supere de tres a seis veces la carga superficial para conseguir una sedimentación de partículas adecuada; ya que a velocidades de sedimentación 30% mayores a la carga superficial se obtuvieron concentraciones de SST dentro de los parámetros de calidad establecidos por el ingenio San Antonio.

Para mayor detalle de las curvas individuales de sedimentación, referirse al Apéndice E.

5.4. Determinación de la eficiencia de remoción del proceso

Las eficiencias de remoción resultantes para el CL-250, el FI-250 01, y la eficiencia de remoción general de la planta de tratamiento para los períodos Z20-21 y Z20-22 se muestran en la tabla 5.6; los cálculos se detallan en el Apéndice F:

Tabla 5.6. Comparación de la eficiencia de remoción de sólidos en Z20-21 y Z21-22.

| Eficiencia de remoción | Z20-21 | Z21-22 |
|------------------------|--------|--------|
| η_{CL} | 99.53% | 99.42% |
| η_{FIROT} | 18.29% | 54.14% |
| η_{Planta} | 99.42% | 99.80% |

La eficiencia de remoción para el clarificador en el período Z20-21 fue de 99.53%, obteniéndose una concentración de SST en el agua clarificada de 46.18 ppm, la cual, a pesar de ser baja, no logra cumplir con el límite máximo establecido para esta concentración.

El alto valor de eficiencia de remoción general, indica que la planta de tratamiento logra entregar agua clarificada con bajo contenido de SST a partir del agua proveniente de los sistemas de lavado.

Sin embargo, la dosificación de floculante en este período fue ineficiente; al no contarse con una dosis óptima establecida para las distintas concentraciones de sólidos suspendidos totales entrantes al sistema, se tuvo un mal manejo operacional del producto, lo que tendió a una dosificación de floculante en escasez o en exceso.

Esta causa explica, en cierta medida, la eficiencia de remoción de 18.29% correspondiente al filtro rotativo, la cual evidencia un manejo inadecuado de los sólidos obtenidos durante el proceso de tratamiento. Según la tabla A.4., donde se exponen los caudales de las corrientes, se observó que el caudal a la salida del filtro rotativo es muy bajo en comparación a los caudales captados por este equipo.

Para interpretar la baja carga de lodos, y por ende baja eficiencia en el filtro rotativo, se detallan posibles causas:

- Daños en las mallas del filtro, lo cual permitió el paso de sólidos de mayor tamaño al clarificador.
- Bajas alturas de los espirales y bajos tiempos de retención, permitiendo el paso de sólidos con altos contenidos de humedad a la salida del sistema.

- Dosificación ineficiente de floculante, evitando así que los sólidos logren aglomerarse en cierta medida dentro del filtro, permitiendo mayor paso de impurezas hacia la recirculación en el sistema.

Para el período Z21-22, se obtuvo una eficiencia de remoción de 99.42% para el clarificador, y a como se estableció en la tabla A.4, para este período la concentración de SST en el agua clarificada fue de 17.64 ppm, cumpliéndose la condición de concentración por debajo del límite máximo de 25 ppm establecido por el ingenio.

La disminución de 0.09% en la eficiencia de remoción en el clarificador con respecto al período anterior se debe al aumento de la eficiencia de remoción del filtro, la cual alcanzó un valor de 54.14%. Este aumento de eficiencia se justifica con las siguientes acciones realizadas:

- Rediseño en el espiral del filtro (adición de tramo con altura aumentada), lo que permitió aumentar la cantidad de lodos retenidos dentro del equipo.
- Adecuación de velocidad de rotación del filtro, con el fin de aumentar el tiempo de retención.
- Cambio de área de mallas dañadas, permitiendo una separación más adecuada de los sólidos.
- Optimización de dosis de floculante para distintas concentraciones de SST a la entrada del sistema.

Al aumentar la eficiencia del filtro, mayor cantidad de sólidos se dirigió a los volquetes y menor contenido de sólidos se envió al clarificador; según la ecuación para determinar la eficiencia del clarificador, esta situación reduce directamente la eficiencia de remoción del CL-250.

Sin embargo, este arreglo permitió que la eficiencia de remoción general de la planta obtuviera un valor de 99.80%, aumentando 0.38% con respecto a la eficiencia del período anterior, con la diferencia de que el proceso ocurre en condiciones más estables y controladas.

También se determinó el factor de capacidad para ambos escenarios, el cual permite comprender la incidencia de la reestructuración de la planta respecto a su desempeño; este factor se muestra en la tabla 5.7.

Tabla 5.7. Factor de capacidad para Z20-21 y Z21-22.

| FC_{Z20-21} | FC_{Z21-22} |
|----------------------------|----------------------------|
| 71.64% | 92.73% |

Al obtener una eficiencia de remoción general de la planta prácticamente invariable, pero con mayor factor de capacidad, se soporta la teoría de que la planta no solamente operaba ineficientemente en términos de calidad de remoción de sólidos, sino que también operaba a bajo rendimiento, siendo subutilizada.

5.5. Análisis financiero

5.5.1. Inversión

La tabla 5.8 detalla el valor de las mejoras realizadas en la planta de tratamiento de agua con ceniza. La inversión total de la reingeniería fue de \$60 058.75, donde \$40 698.94 pertenecen a gastos en materiales, mientras que la diferencia corresponde a mano de obra.

Tabla 5.8. Descripción de inversión realizada por reingeniería.

| Código | Equipo | Monto (\$) |
|-------------------------------|--|--------------------|
| FI25001 | Filtro rotativo | \$3 753.82 |
| TV25001 | Chute y filtro | \$777.63 |
| PU276A | Bomba lodos a clarificador 1 | \$285.94 |
| PU276B | Bomba lodos a clarificador 2 | \$330.42 |
| CL25001 | Clarificador | \$18 551.1 |
| Panel de control | Bomba sistema de agua clara Planta de Cenizas | \$17 000 |
| Inversión total en materiales | | \$40 698.94 |
| Mano de obra de rediseño | | \$19 359.81 |
| Inversión Total | | \$60 058.75 |

5.5.2. Costos

Con la planta operando a la capacidad actual, el costo de operación en el presente año es de \$287 341.10, el cuál varía anualmente a medida que los viajes de volquetes encarecen. Según datos históricos del Ingenio San Antonio, la tendencia de incremento de coste por viaje es la expuesta en la tabla 5.9

Tabla 5.9. Coste histórico de los viajes de volquetes y proyección respecto al paso del tiempo.

| Año | Costo histórico (\$) | Año | Costo pronosticado (\$) |
|------|----------------------|------|-------------------------|
| 2018 | 16.5 | 2022 | 20 |
| 2019 | 12.57 | 2023 | 22.72 |
| 2020 | 12.83 | 2024 | 25.46 |
| 2021 | 17.94 | 2025 | 28.2 |

Esta fluctuación en los precios influye en el incremento de aproximadamente \$10 000 por año, asumiendo que la planta siempre producirá el mismo volumen de lodos y, por ende, la misma cantidad de viajes diarios.

En el acápite 5.3 se aclaró que el consumo de floculante diario permanecía a 1 ppm, debido a que esta dosificación permite resultados satisfactorios respecto a criterios establecidos por el Ingenio San Antonio. Por esta razón, el coste se mantiene constante y con un valor \$31 978.56 en cada zafra. Un detalle de los costos totales se observa en la tabla 5.10:

Tabla 5.10. Costos totales por la existencia de la PTAC.

| Zafra | Z 21-22 | Z 22-23 | Z 23-24 |
|-------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Mano de obra | \$5 323.94 | \$5 323.94 | \$5 323.94 |
| Costos de energía | \$138 801.60 | \$138 801.60 | \$138 801.60 |
| Costos de mantenimiento | \$24 000.00 | \$24 000.00 | \$24 000.00 |
| Costo por transporte | \$87 237.00 | \$97 200.00 | \$110 419.20 |
| Consumo de floculante | \$31 978.56 | \$31 978.56 | \$31 978.56 |
| Costo total | \$287 341.10 | \$297 304.10 | \$310 523.30 |

5.5.3. Ingresos

Los ingresos de la planta también varían según el coste del transporte. El cambio en el precio por viajes es uno de los factores de mayor relevancia para justificar la inversión en la mejora de la planta, ya que permite un ahorro entre \$ 80 000 hasta más de \$120 000 al año en el horizonte de tiempo de análisis; tales cifras se logran

debido a que previo a la reingeniería se realizaba un aproximado de 4 viajes por hora, sumando un total de 96 viajes por día y, con la capacidad actual, los viajes se redujeron a 30 por día, obteniendo una ganancia de 10 368 viajes durante los 162 días de operación.

El segundo beneficio remarcable es el generado por la disminución en la periodicidad del mantenimiento, repercutiendo principalmente en las chimeneas de las calderas, los ventiladores inducidos, y los ductos. Este ahorro se considera constante para el período de estudio y su detalle se presenta en el Apéndice H. En la tabla 5.11 se reflejan los detalles de los ingresos totales durante el estudio.

Tabla 5.11. Beneficios económicos generados por la PTAC.

| Zafra | Z 21-22 | Z 22-23 | Z 23-24 |
|--------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Ahorro transporte | \$191 921.40 | \$213 840.00 | \$242 922.24 |
| Ahorro en energía | \$43 545.60 | \$43 545.60 | \$43 545.60 |
| Ahorros en mantenimiento | \$89 500.00 | \$89 500.00 | \$89 500.00 |
| Ingresos totales | \$324 967.00 | \$346 885.60 | \$375 967.84 |

5.5.4. Relación Beneficio-Costo

Siguiendo lo expuesto en el acápite 4.7, los resultados de indicadores económicos del proyecto se muestran en la tabla 5.12 y en mayor detalle en Apéndice H.

Tabla 5.12. Indicadores económicos de la reingeniería en la planta de tratamiento de agua con cenizas

| Indicadores | Resultado |
|--------------------|---------------------|
| $VPN_{Beneficios}$ | \$792 080.31 |
| VPN_{Costos} | \$738 899.30 |
| VPN | \$53 181.01 |
| B/C | 1.07 |
| n | 2.41 años |

Con los resultados obtenidos, se observa que la inversión realizada en la reingeniería para la planta de tratamiento de agua con cenizas fue económicamente viable, debido a que se obtienen 1.07 beneficios con respecto a los costos e inversiones en las que se incurrió en el proyecto. La recuperación de lo invertido comenzará a los 2 años y 5 meses de iniciado el proyecto, pronosticando ingresos netos a mediados en el año 2023.

6. CONCLUSIONES

A través de este documento monográfico, se logró realizar una evaluación completa de la planta de tratamiento de agua con cenizas pertenecientes al ingenio San Antonio; principalmente a través de la comparación de datos históricos de la empresa en el período de zafra 2020-2021 contra datos recopilados en el período de Z21-22, posteriores a la reingeniería aplicada en el sistema de tratamiento.

Por medio de la caracterización de parámetros fisicoquímicos, se evidenció el impacto positivo generado por la reingeniería aplicada en la planta de tratamiento de agua con cenizas. Desde la disminución de más del 5% del contenido de humedad de lodos a la salida del sistema respecto a Z20-21, hasta la obtención de agua clarificada con 17.64 ppm de sólidos suspendidos totales, se observó el aumento de la calidad de los efluentes entregados para Z21-22. El promedio del índice de Ryznar para Z21-22 fue de 5.63, aumentando 0.02 respecto a Z20-21; la tendencia del agua clarificada utilizada para lavado es levemente incrustante, lo que puede afectar en mediano plazo a los rociadores de los *scrubbers* y las tuberías de transporte.

La dosificación óptima de floculante fue un punto clave en esta evaluación. Se determinó que en el rango de operación de 0.67 a 1.16% de sólidos suspendidos totales en el agua a tratar, una concentración de 1.5 ppm de floculante es la adecuada a nivel de laboratorio, obteniéndose concentraciones menores a 25 ppm de sólidos suspendidos totales. Sin embargo, debido al producto químico residual que permanece recirculando en el proceso, resulta adecuado mantener una dosificación de 1 ppm de floculante en nivel industrial.

La mejora en la operación fue notable en la eficiencia de remoción del filtro rotativo, aumentando en un 37.76% respecto a Z20-21. La eficiencia de remoción del clarificador disminuyó en 0.16%; sin embargo, la eficiencia de remoción de la planta aumentó 0.33%, denotándose un aumento global en el rendimiento del proceso. A su vez, a través de la reingeniería, la capacidad de la planta aumentó de 788 m³/h a 1 020 m³/h, repercutiendo en un aumento del 21.09% según los factores de capacidad calculados.

El estudio económico refleja que el proyecto de reingeniería ejecutado en 2021 a la planta de tratamiento resultó económicamente viable; con una relación beneficio-costos de 1.07, y un período de recuperación de 2 años y 5 meses. A su vez, se logró cumplir parcialmente con una de las metas internas en el ingenio, que fue la de disminuir el número de viajes de 96 viajes de volquetes al día a 16, siendo la cantidad de viajes actuales de 30

7. RECOMENDACIONES

Las recomendaciones para la empresa están orientadas a la instalación de equipos y mejoras en la planificación de las tomas de muestras en las áreas de mayor importancia para el proceso, éstas se detallan a continuación.

Se recomienda la instalación de un controlador *feedforward*, que permita dosificar floculante a concentraciones establecidas, utilizando la concentración de sólidos suspendidos totales a la entrada del sistema como variable de control.

Asimismo, la instalación de un filtro de banda como derivación de la corriente de lodos finos del filtro rotativo permitiría mayor compactación de los sólidos finales y recuperar la mayor cantidad de agua posible.

En base al valor promedio de 5.63 del índice de Ryznar, es aconsejable evaluar la dosificación de un producto químico antiincrustante o regulador de pH, con el objetivo de mitigar la tendencia incrustante de la corriente de agua clarificada.

Las muestras de las corrientes de agua homogeneizada, *UnderFlow* y lodos a la salida de filtro rotativo, a diferencia de las que se toman para el agua clarificada, no tienen horas establecidas ni frecuencia para tomarse por lo que pueden resultar no representativas. Factores como el soplado de hollín en los equipos de recuperación de calor, alta humedad o alto contenido de ceniza en bagazo pueden sesgar los resultados obtenidos si no se tiene control de ellos, por lo cual es aconsejable cambiar la planificación de muestreo para los análisis de SST.

Para obtener mayor representatividad de la operación se deben ajustar los límites de control establecidos a la entrada del sistema en base a ciertos criterios:

- El escenario en el que se encuentre el ingenio (zafra o generación).
- Cuando se ajusten los variadores de las bombas que alimenten el sistema.
- En el caso que se realice una nueva conexión de corrientes externas al lavado, con el fin de utilizar agua de reposición.
- Cada 3 meses, con el objetivo de mantener control y estabilidad en el proceso.

En estos casos se aconseja utilizar gráficos de control XR, ya que con ellos puede calcularse la desviación estándar que presenta el proceso y sus límites operativos basándose en datos históricos, lo que permitirá mantener un control más exacto y frecuente de la operación. Sin embargo, para utilizar esta herramienta es necesario modificar la frecuencia de muestro para el cálculo de SST, realizando más de una medición al día en horas establecidas con la finalidad de realizar sub grupos de tamaños definidos y representativos.

Es necesario mantener comunicación directa con el personal encargado de los soplados de hollín, para conocer los momentos exactos de esta operación y obtener muestras de agua homogeneizada más representativas. En el caso de la biomasa con alto contenido de ceniza o humedades altas, se dificulta mantener control de estas variables puesto que son naturales del combustible utilizado.

REFERENCIAS

- APSP Recreational Water Quality Committee [RWQC]. (2017). *Water balance Indexes*. The Association of Pool & Spa Professionals [ASPS].
- Asociación de Productores y Exportadores de Nicaragua [APEN]. (2021). *Informe de exportaciones 2021*. Managua: [APEN].
- Baca Urbina, G. (2007). *Fundamentos de Ingeniería Económica (Cuarta edición)*. México D.F: Mc Graw Hill.
- Baca Urbina, G. (2013). *Evaluación de proyectos*. México D.F.: McGrawHill.
- Bhargava, A. (2016). Wet Scrubbers - Desing of spray tower to control air pollutants. *International Journal of Enviromental Planning and Development, Vol 2*, 68-73.
- Blank, L., & Tarquin, A. (2012). *Ingeniería Económica (Séptima Edición)*. México: McGraw-Hill.
- Caraballo, D. (2009). *Metodología para el diseño y evaluación de intercambiadores de calor tipo Box Cooler*. Cartagena: Universidad Tecnológica de Bolivar .
- Cedeño, L. (2018). *Fundamentos básicos de cálculos de Ingeniería Química con enfoque en alimentos*. Ecuador: Ediciones UTMACH.
- CENNIC. (2021). *Feria Nacional de la Tierra 2021*. CENNIC.
- Clesceri, L. S., Greenberg, A. E., & Eaton, A. D. (1999). *Standar Methods for the examination of Water and Wastewater* (Veinteava ed.). American Public Health Association, American Water Works Association, Water Enviroment Federation.
- Coloch González, L. W. (2017). Propuesta para el montaje de una planta de tratamiento de cenizas contenidas en el agua proveniente de lavadores de gases de combustión de calderas en Central Agro Industrial Guatemalteca, S.A. (*Trabajo de graduación*). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- Comisión Venezolana de Normas Industriales [COVENIN]. (1986). Agua. Determinación de dureza total y calcio. Método volumétrico. Determinación de magnesio por cálculo. *COVENIN 2408-86*.
- Cristobal, F. (2005). *Descripción hidráulica de la batería de filtros de planta No. 1 de la Atarjea*. Lima, Peru: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Department of Water Affairs and Forestry [DWAF]. (1996). *South African Water Quality Guideliness (second edition)*. Pretoria, South Africa: The Government Printer, PRETORIA.

- Department of Water Affairs and Forestry. (1996). *South African Water Quality Guidelines (second edition)*. Pretoria, South Africa: The Government Printer, PRETORIA.
- Empresa Nacional de Transmisión Eléctrica [ENATREL]. (2021). *Avances en el Sector de Energía de Nicaragua (11 al 17 de Noviembre 2021)*. Managua: ENATREL.
- Grupo DLC. (2015). *Tratamiento de Aguas y Soluciones Ambientales*. Santiago.
- Hernandez, A. (2007). *Sólidos suspendidos totales en agua de secado a 103-105 C*. Colombia: IDEAM.
- Hewitt, P. G. (2009). *Física Conceptual* (Décima ed.). México: Pearson Educación.
- IDAE. (2007). *Biomasa: producción eléctrica y cogeneración*. Madrid, España: Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía.
- Izquierdo, J. P., Álvarez, M. J., & Rojas, M. A. (2019). Uso de la ceniza de bagazo de caña (CBC) como reemplazo parcial del cemento Portland - Caso Colombia. *Ibracon*.
- Kemmer, F. N. (1988). *The Nalco Water Handbook*. McGraw-Hill.
- La Gaceta. (2017, Junio 09). Resolución Ministerial No. 002-DGERR-002-2017. *La Gaceta*, p. 108.
- Li, Q., & Hui, Z. (2016). Effects of ash deposition and slagging on heat transfer. *ResearchGate*.
- Maltodano, V. (2004). Tomo II, Capítulo 7: Sedimentación. In L. Vargas, *Tratamiento de agua para consumo humano* (pp. 1-58). Lima, Perú: Organización Panamericana de la Salud.
- Martinez, A. (2008). *Reducción de volumen de lodos de planta de tratamiento de aguas urbanas via filtración*. Valparaíso, Chile: Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
- Miranda, R. (2018). *Calderas: Clasificación, usos y mecanismos de transferencia de calor*. Puebla, México: Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Mora, V., & Cedeño, J. (2006). Simulación de índices de tendencia de incrustación y corrosión por agua en planta de potabilización. *Saber*, 212-219.
- Morales, G. (2014). *Evaluación de la estabilidad de un sistema de lodos activados mediante indicadores fisicoquímicos y biológicos*. Concepción, Chile: Universidad de Concepción.
- Nicaragua Sugar. (2014). *Nicaragua Sugar*. Retrieved from https://www.nicaraguasugar.com/index.php?option=com_content&view=article&id=5&Itemid=127

- Oelker, A. (2007). *Thermal Engineering*. Santiago, Chile: Thermal Engineering Ltda.
- Orozco, G., Rivas, P., & Urcuyo, R. (2020). *Mercado eléctrico en Nicaragua. Diagnóstico y recomendaciones*. Managua: FUNIDES.
- Pérez Farrás, L. E. (2005). *Teoría de la sedimentación*. Asunción: Instituto de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.
- Rein, P. (2017). *Cane Sugar Engineering*. Berlin: Verlag Dr. Albert Bartens KG.
- Resano, D., Guillen, O. W., Ubillús, F. D., & Barranzuela, J. L. (2022). Caracterización fisicoquímica del bagazo de caña de azúcar industrial y artesanal como material de construcción. *Información Tecnológica*, 718-764.
- Revista Construir. (2017). ¿Cuánta energía limpia produce Nicaragua? *Revista Construir*.
- Rusydi, A. F. (2018). Correlation between conductivity and total dissolved solid in various type of water: A review. *Earth and Environmental Science*.
- Ryznar, J. W. (1944). A New Index Determining Amount Of Calcium Carbonate Scale Formed by a Water. *J. American Water Works Association*.
- Santos, M. (2002). *Análisis de la relación Beneficio/Costo de la implementación de obras de conservación de suelo: Ocho estudios de caso en la comunidad de La Ciénega, San Antonio de Oriente, Honduras*. Honduras: ZAMORANO.
- SER San Antonio. (2021). *Planta de cenizas: Ajuste, reingeniería, mejoras, sostenibilidad*. Chichigalpa: SER San Antonio.
- Sincal. (2018). *Informacion tecnica ITSI-03. Calidad del agua de calderas*. Toledo, España: Sincal, Calderas Industriales, S.L.
- Sociedad Americana Para Pruebas y Materiales [ASTM]. (2002). Standard Test Method for acidity or alkalinity in water. *ASTM D1067-02*.
- Sociedad Americana Para Pruebas y Materiales [ASTM]. (2002). Standard Test Method for Hardness in Water. *ASTM D1126-02*.
- Spirax Sarco. (2011). *The Steam and Condensate Loop*. Cheltenham: Spirax Sarco.
- Trujillo, E., Martínez, V., & Nadia, F. (2008). Ajusto del Equilibrio Químico del Agua Potable con Tendencia Corrosiva por Dióxido de Carbono. *Información Tecnológica*. Vol 19, 89-101.
- Unday, G. (2005). *Estudio del impacto ambiental del uso del bagazo como fuente de energía en centrales azucareros en Cuba*.

- Universidad de Valencia [UDV]. (2009). Tema 4: Fenomenos de Transporte. In *Química y Física Avanzada*. Valencia, España: Universidad de Valencia.
- Universidad Pedagógica Nacional. (2021). *Manual de operación y mantenimiento de calderas y sus sistemas anexos*. Bogotá.
- Varela, S. (2021, Noviembre 15). Función de la planta de tratamiento de agua con cenizas del área de cogeneración del Ingenio San Antonio. (O. Varela, Interviewer)
- Vaz, C. M., Stamile Soares, S. M., & da Silva, J. O. (2014). Sistema para tratamiento de agua de ceniza de lavado de gases de caldera. *Engenovo*.
- Vizueta Méndez, J. A. (2013). Implementación de un nuevo sistema de tratamiento de agua con ceniza proveniente de los lavadores de gases de combustión de las calderas del ingenio San Carlos. (*Tesis de Grado*). Facultad Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, Guayaquil, Ecuador.

APÉNDICES

Apéndice A. Recolección de muestras en Z20-21 y Z21-22

Tabla A.1. Parámetros de calidad de agua clarificada en Z20-21

| Fecha | %SST en agua homogeneizada | %SST en lodos concentrados | %SST en lodos hacia volquetes | % Humedad en lodos hacia volquetes |
|-------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| 18/02/2021 | 0.71 | 6.07 | 16.54 | 83.46 |
| 23/02/2021 | 0.61 | 10.2 | 18.44 | 81.56 |
| 24/02/2021 | 0.98 | 11.38 | 25.36 | 74.64 |
| 24/02/2021 | 0.99 | 9.18 | 18.66 | 81.34 |
| 25/02/2021 | 0.68 | 11.8 | 23.39 | 76.61 |
| 26/02/2021 | 0.31 | 10.73 | 15.56 | 81.82 |
| 27/02/2021 | 0.71 | 6.07 | 16.54 | 83.46 |
| 28/02/2021 | - | - | 11.14 | 88.86 |
| 01/03/2021 | 0.57 | 2.04 | 9.98 | 90.02 |
| 02/03/2021 | 0.61 | 7.97 | 26.82 | 73.18 |
| 03/03/2021 | 0.71 | 10.79 | 19.62 | 80.38 |
| 04/03/2021 | 0.61 | 8.69 | 18.86 | 81.14 |
| 05/03/2021 | 0.83 | 6.56 | 19.67 | 80.33 |
| 07/03/2021 | 0.66 | 8.5 | 18.9 | 82 |
| 08/03/2021 | 0.66 | 9.98 | 15.48 | 84.52 |
| 09/03/2021 | 0.62 | 2.19 | 19.12 | 80.88 |
| 10/03/2021 | 0.69 | 9.75 | 14.4 | 85.6 |
| 11/03/2021 | 0.68 | 9.75 | 17.55 | 82.45 |
| 12/03/2021 | 0.79 | 3.4 | 29.69 | 70.31 |
| 13/03/2021 | 0.76 | 5.40 | 20.16 | 69.64 |
| 15/03/2021 | 0.82 | 10.01 | 17.46 | 82.54 |
| 16/03/2021 | 1.35 | 10.1 | 14.19 | 85.81 |
| 17/03/2021 | 0.78 | 4.14 | 16.77 | 83.23 |
| 18/03/2021 | 0.72 | 3.22 | 16.86 | 83.14 |
| 19/03/2021 | 0.93 | 16.9 | 18.62 | 81.38 |
| 20/03/2021 | 0.94 | 4.31 | 21.19 | 78.81 |
| 21/03/2021 | 0.64 | 2.18 | 26.9 | 73.1 |
| 22/03/2021 | 1.05 | 2.61 | 15.36 | 84.64 |
| 23/03/2021 | 1.21 | 3.44 | 16.88 | 83.12 |
| 24/03/2021 | 1.04 | 3.37 | 15.5 | 84.5 |
| 25/03/2021 | 0.83 | 6.25 | 16.31 | 83.69 |

Tabla A.2. Parámetros de calidad de agua clarificada en Z21-22

| Fecha | pH | Dureza ppmCaCO ₃ | T°F | STD (ppm) | Alc. Total ppmCaCO ₃ | SST (ppm) | Índice de Ryznar (-) |
|--------|------|--------------------------------|--------|--------------|------------------------------------|--------------|-------------------------------|
| 7-ene | 7.54 | 285.00 | 111.36 | 608.25 | 261.50 | 12.63 | 5.95 |
| 8-ene | 7.32 | 257.00 | 108.15 | 585.90 | 252.25 | 14.13 | 6.35 |
| 9-ene | 7.29 | 274.50 | 115.25 | 572.13 | 259.25 | 16.50 | 6.14 |
| 10-ene | 7.64 | 276.25 | 107.33 | 614.83 | 276.50 | 9.63 | 5.90 |
| 11-ene | 7.52 | 301.25 | 113.46 | 500.43 | 266.00 | 31.50 | 5.84 |
| 12-ene | 7.56 | 302.00 | 116.60 | 551.38 | 272.75 | 8.13 | 5.72 |
| 13-ene | 7.67 | 336.00 | 111.55 | 565.75 | 294.00 | 16.00 | 5.55 |
| 14-ene | 7.85 | 320.00 | 112.60 | 608.98 | 264.50 | 9.00 | 5.52 |
| 15-ene | 7.78 | 277.00 | 110.30 | 603.93 | 251.00 | 13.75 | 5.80 |
| 16-ene | 7.34 | 290.50 | 111.26 | 602.88 | 269.75 | 26.38 | 6.10 |
| 17-ene | 7.72 | 300.50 | 110.11 | 575.13 | 268.00 | 25.75 | 5.71 |
| 18-ene | 7.67 | 301.00 | 111.90 | 627.27 | 268.50 | 19.63 | 5.73 |
| 19-ene | 7.69 | 314.00 | 112.43 | 581.50 | 263.75 | 24.25 | 5.67 |
| 20-ene | 7.75 | 308.00 | 111.93 | 579.25 | 270.00 | 15.63 | 5.62 |
| 21-ene | 7.42 | 305.75 | 113.75 | 575.81 | 254.25 | 15.00 | 5.97 |
| 22-ene | 7.78 | 346.00 | 111.99 | 568.88 | 249.25 | 12.25 | 5.66 |
| 23-ene | 7.23 | 315.00 | 112.09 | 585.05 | 235.00 | 14.88 | 6.25 |
| 24-ene | 7.71 | 304.00 | 113.34 | 605.00 | 278.00 | 14.13 | 5.62 |
| 25-ene | 7.87 | 321.25 | 113.35 | 599.75 | 279.63 | 8.50 | 5.41 |
| 26-ene | 7.79 | 311.75 | 115.13 | 615.00 | 278.63 | 11.38 | 5.48 |
| 27-ene | 7.81 | 302.67 | 115.65 | 603.58 | 286.33 | 30.50 | 5.48 |
| 28-ene | 7.58 | 305.50 | 116.29 | 580.80 | 255.25 | 17.13 | 5.78 |
| 29-ene | 7.63 | 273.75 | 113.31 | 538.65 | 241.50 | 15.50 | 5.90 |
| 30-ene | 7.72 | 256.00 | 114.53 | 622.85 | 258.75 | 17.75 | 5.81 |
| 31-ene | 7.72 | 313.25 | 111.50 | 597.49 | 268.25 | 31.88 | 5.66 |
| 1-feb | 7.66 | 296.75 | 108.30 | 594.64 | 268.50 | 21.38 | 5.82 |
| 2-feb | 7.74 | 283.75 | 109.75 | 551.49 | 266.50 | 14.25 | 5.75 |
| 3-feb | 7.70 | 302.67 | 112.63 | 569.13 | 264.67 | - | 5.69 |
| 4-feb | 7.63 | 289.25 | 115.59 | 622.45 | 266.63 | 15.50 | 5.74 |

| | | | | | | | |
|--------|------|--------|--------|--------|--------|-------|------|
| 5-feb | 7.74 | 278.00 | 118.93 | 625.95 | 264.25 | 28.38 | 5.60 |
| 6-feb | 7.72 | 304.50 | 115.13 | 607.85 | 273.25 | 22.63 | 5.59 |
| 7-feb | 7.62 | 321.50 | 115.20 | 627.10 | 286.50 | 23.13 | 5.60 |
| 8-feb | 7.66 | 303.71 | 117.99 | 648.80 | 257.71 | - | 5.65 |
| 9-feb | 7.89 | 304.13 | 111.11 | 558.76 | 258.25 | - | 5.54 |
| 10-feb | 8.00 | 301.25 | 115.66 | 581.71 | 262.50 | - | 5.34 |
| 11-feb | 7.72 | 306.25 | 117.91 | 611.65 | 285.75 | - | 5.49 |
| 12-feb | 7.94 | 288.00 | 117.10 | 620.75 | 277.00 | 6.83 | 5.38 |
| 13-feb | 7.81 | 306.00 | 116.85 | 611.03 | 280.00 | 13.75 | 5.44 |
| 14-feb | 7.90 | 338.25 | 115.89 | 598.03 | 285.50 | 17.13 | 5.26 |
| 15-feb | 7.86 | 278.50 | 118.24 | 628.60 | 273.00 | 10.50 | 5.47 |
| 16-feb | 7.92 | 313.25 | 117.59 | 605.73 | 271.50 | 14.88 | 5.33 |
| 17-feb | 7.93 | 317.14 | 117.63 | 664.40 | 300.00 | 8.00 | 5.22 |
| 18-feb | 7.74 | 280.25 | 117.38 | 653.59 | 297.50 | 12.63 | 5.53 |
| 19-feb | 7.88 | 254.75 | 117.66 | 631.20 | 268.25 | 10.00 | 5.55 |
| 20-feb | 7.80 | 308.00 | 117.98 | 647.75 | 292.00 | 18.50 | 5.39 |
| 21-feb | 7.85 | 328.00 | 112.28 | 572.81 | 274.75 | 19.25 | 5.45 |
| 22-feb | 7.89 | 290.88 | 113.24 | 608.13 | 277.00 | 31.25 | 5.49 |
| 23-feb | 7.87 | 295.50 | 116.41 | 600.03 | 274.88 | 17.00 | 5.43 |
| 24-feb | 7.64 | 288.50 | 121.98 | 607.40 | 268.00 | 22.13 | 5.60 |
| 25-feb | 7.56 | 349.00 | 116.64 | 591.71 | 261.00 | 27.88 | 5.65 |
| 26-feb | 7.68 | 271.25 | 117.35 | 638.66 | 270.00 | 20.00 | 5.70 |
| 27-feb | 7.96 | 302.00 | 118.15 | 623.50 | 278.00 | 18.00 | 5.28 |
| 28-feb | 7.75 | 322.25 | 117.09 | 635.98 | 256.75 | 16.13 | 5.53 |
| 1-mar | 7.85 | 300.50 | 116.34 | 639.15 | 277.00 | 32.25 | 5.44 |
| 2-mar | 7.90 | 298.00 | 116.10 | 654.84 | 281.00 | 34.38 | 5.41 |
| 3-mar | 7.81 | 277.75 | 117.23 | 558.58 | 263.00 | - | 5.55 |
| 4-mar | 8.06 | 279.50 | 110.68 | 581.05 | 273.00 | 18.00 | 5.42 |
| 5-mar | 7.62 | 265.50 | 118.81 | 620.65 | 259.50 | 21.63 | 5.78 |
| 6-mar | 7.78 | 268.50 | 113.89 | 658.50 | 291.50 | 19.13 | 5.62 |

Tabla A.3. Contenido de Sólidos suspendidos totales en agua clarificada, lodos concentrados, y lodos hacia volquetes en Z21-22

| Fecha | %SST en agua clarificada | %SST en lodos concentrados (UF) | %SST en lodos hacia volquetes | % Humedad de lodos hacia volquetes |
|-----------|--------------------------|---------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| 10-ene-22 | 0.59% | 2.16% | 18.89% | 81.11% |
| 11-ene-22 | 0.56% | 2.19% | 21.05% | 78.95% |
| 12-ene-22 | 0.55% | 3.02% | 25.20% | 74.80% |
| 13-ene-22 | 0.67% | 3.13% | 23.87% | 76.13% |
| 16-ene-22 | 0.60% | 2.02% | 18.71% | 81.29% |
| 17-ene-22 | 0.82% | 2.01% | 37.44% | 62.56% |
| 19-ene-22 | 0.84% | 4.56% | 20.61% | 79.39% |
| 22-ene-22 | 0.95% | 2.30% | 22.40% | 77.60% |
| 24-ene-22 | 0.83% | 2.37% | 33.08% | 66.92% |
| 25-ene-22 | 0.62% | 1.77% | 20.70% | 79.30% |
| 26-ene-22 | 0.52% | 2.50% | 26.63% | 73.37% |
| 27-ene-22 | 0.51% | 2.12% | 25.76% | 74.24% |
| 28-ene-22 | 0.72% | 2.44% | 27.82% | 72.18% |
| 29-ene-22 | 0.47% | 2.58% | 26.86% | 73.14% |
| 02-feb-22 | 0.95% | 2.30% | 22.40% | 77.60% |
| 03-feb-22 | 1.41% | 2.05% | 27.20% | 72.80% |
| 04-feb-22 | 0.83% | 2.37% | 33.08% | 66.92% |
| 06-feb-22 | 0.62% | 1.77% | 20.70% | 79.30% |
| 07-feb-22 | 0.52% | 2.50% | 26.63% | 73.37% |
| 08-feb-22 | 0.51% | 2.12% | 25.76% | 74.24% |
| 09-feb-22 | 0.72% | 2.44% | 27.82% | 72.18% |
| 13-feb-22 | 0.50% | 1.77% | 17.83% | 82.17% |
| 14-feb-22 | 0.63% | 2.05% | 18.87% | 81.13% |
| 15-feb-22 | 0.45% | 2.15% | 27.30% | 72.70% |
| 16-feb-22 | 0.50% | 1.30% | 21.65% | 78.35% |
| 18-feb-22 | 0.45% | 2.08% | 22.50% | 77.50% |
| 20-feb-22 | 0.52% | 2.41% | 17.60% | 82.40% |
| 21-feb-22 | 0.61% | 4.36% | 16.21% | 83.79% |
| 22-feb-22 | 0.56% | 2.86% | 23.27% | 76.73% |
| 23-feb-22 | 0.53% | 2.56% | 22.05% | 77.95% |
| 24-feb-22 | 0.58% | 4.24% | 32.66% | 67.34% |
| 27-feb-22 | 0.50% | 2.62% | 21.49% | 78.51% |
| 01-mar-22 | 0.63% | 2.73% | 19.79% | 80.21% |
| 02-mar-22 | 0.61% | 2.56% | 27.78% | 72.22% |
| 03-mar-22 | 0.57% | 2.79% | 22.10% | 77.90% |
| 06-mar-22 | 0.81% | 1.09% | 20.00% | 80.00% |

Tabla A.4. Comparación de parámetros de calidad del agua para Z20-21 y Z21-22 con valores promediados

| Punto de muestreo | | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | |
|--|--------------------------|--------------------|--------|---------------|--------|-------------------------|--------|-----------------------|--------|-----------------------|--------|
| Corriente | | Agua homogeneizada | | Agua filtrada | | Lodos concentrados (UF) | | Agua clarificada (OF) | | Lodos hacia volquetes | |
| Parámetros | Unidades | Z20-21 | Z21-22 | Z20-21 | Z21-22 | Z20-21 | Z21-22 | Z20-21 | Z21-22 | Z20-21 | Z21-22 |
| Densidad de mezcla | g/ml | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Contenido de Sólidos Suspendidos Totales | %m/m | 0.78 | 0.84 | 0.8 | 0.27 | 7.23 | 2.85 | 0.0046 | 0.0017 | - | - |
| Contenido de Humedad | %m/m | - | - | - | - | - | - | - | - | 81.17 | 76.05 |
| Densidad de sólidos en base seca | g/ml | - | - | - | - | - | - | - | - | 1 | 0.97 |
| SST | ppm | - | 9135 | - | - | - | - | 46.18 | 17.64 | - | - |
| pH | - | - | 7.99 | - | - | - | - | 8.08 | 7.72 | - | - |
| Temperatura | °F | - | 104 | - | - | - | - | 103.19 | 114.51 | - | - |
| STD | ppm | - | 488 | - | - | - | - | 531.59 | 602.07 | - | - |
| Dureza total | ppm CaCO ₃ | - | 360 | - | - | - | - | 271.33 | 298.49 | - | - |
| Alcalinidad total | ppm CaCO ₃ | - | 258 | - | - | - | - | 256.67 | 269.95 | - | - |
| IRz | - | - | 5.42 | - | - | - | - | 5.61 | 5.63 | - | - |

Apéndice B. Memoria de cálculo: parámetros de calidad del agua

B.1. Determinación de cantidad de sólidos suspendidos totales

Contenido de sólidos suspendidos totales en agua homogeneizada con valores promediados, determinados por el analizador de humedad:

$$C_{SST} = \left(1 - \frac{m_M - m_{LBS}}{m_M}\right) * 100$$

$$C_{SST} = \left(1 - \frac{55 \text{ g} - 0.462}{55 \text{ g}}\right) * 100$$

$$C_{SST} = 0.84\%$$

Contenido de sólidos suspendidos totales en lodos concentrados con valores promedios durante periodo de muestreo:

$$C_{SST} = \left(1 - \frac{m_M - m_{LBS}}{m_M}\right) * 100$$

$$C_{SST} = \left(1 - \frac{55 \text{ g} - 1.57}{55 \text{ g}}\right) * 100 = 2.85\%$$

B.2. Concentración de sólidos totales disueltos en agua clarificada

El siguiente cálculo se realizó tomando un valor de conductividad promediado en el periodo de muestreo:

$$C_{STD} = 0.7G$$

$$C_{SST} = 0.7 * 861 \mu\text{S}/\text{cm} = 602.07 \text{ ppm}$$

B.3. Concentración de dureza y alcalinidad total

La dureza fue tomada en base a valores promediados

$$C_{DT} = \frac{C_{CaCO_3} * V_{EDTA}}{V_M} = \frac{1 \frac{mg}{mL} * 7.46 mL}{0.025 L}$$

$$C_{DT} = 298.48 ppm CaCO_3$$

Se calculó la alcalinidad en base a datos promediados

$$C_{AT} = \frac{V_{H_2SO_4} * C_{H_2SO_4} * PE_{CaCO_3}}{V_M} = \frac{13.5 * 0.02 \frac{meq}{L} * 50 \frac{mg}{meq}}{0.05 L}$$

$$C_{AT} = 269.95 ppm CaCO_3$$

B.4. Índice de incrustación de Ryznar

Se calcularon las variables A, B, C y D para ser sustituidos en la ecuación 4.8:

$$A = \frac{\text{Log}[C_{STD}] - 1}{10} = A = \frac{\text{Log}[602.07] - 1}{10} = 0.178$$

$$B = -13.12 * \text{Log}[T (^{\circ}K)] + 34.55$$

$$B = -13.12 * \text{Log}[318.99] + 34.55 = 1.7$$

$$C = \text{Log}[Dureza Total (CaCO_3)] - 0.4$$

$$C = \text{Log}[298.49 ppm CaCO_3] - 0.4 = 2.075$$

$$D = \text{Log}[Alcalinidad Total (CaCO_3)] = \text{Log}[269.95] = 2.431$$

Entonces, el pH_s es:

$$pH_s = (9.3 + A + B) - (C + D)$$

$$pH_s = (9.3 + 0.178 + 1.7) - (2.075 + 2.429) = 6.675$$

Con este valor es posible determinar el valor de Ryznar, utilizando, de igual forma, el pH medido.

$$IRz = 2pH_s - pH = 2 * 6.675 - 7.72 = 5.63$$

Apéndice C. Memoria de cálculo: balances de materia

C.1. Balance de materia global

La ecuación general del balance de materia está dada de la siguiente forma:

$$\text{Acumulación} = \text{Entrada} - \text{Salida} + \text{Generación} - \text{Consumo}$$

$$\text{Entrada} = \text{Salida}$$

El caudal de lodos hacia volquetes se determina por la masa de lodos en los volquetes y el tiempo de llenado de esa cantidad:

Para Z21-22

$$\dot{m}_{P5} = \frac{m_{LF}}{t_{Ll}} = \frac{11.93 \text{ ton}}{27.3 \text{ min}} \cdot \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hora}} = 26.2 \frac{\text{ton}}{\text{h}}$$

Para Z20-21

$$\dot{m}_{P5} = \frac{m_{LF}}{t_{Ll}} = \frac{11.96 \text{ ton}}{76.76 \text{ min}} \cdot \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hora}} = 13.37 \frac{\text{ton}}{\text{h}}$$

En ambos casos, la densidad es igual a $1 \frac{t}{m^3}$, por lo cual el caudal de lodos hacia volquetes es igual a $26.2 \frac{m^3}{h}$ para Z21-22 y $13.37 \frac{m^3}{h}$ para Z20-21. Por el balance general, se tiene el caudal de agua clarificada para ambos escenarios:

Para Z21-22

$$Q_{TP4} = \frac{(\rho Q)_{TP1} - (\rho Q)_{TP5}}{\rho_{P4}} = \frac{\left(1 \frac{kg}{m^3}\right) \left(1020 \frac{m^3}{h}\right) - \left(1 \frac{kg}{m^3}\right) \left(26.2 \frac{m^3}{h}\right)}{\left(1 \frac{kg}{m^3}\right)} = 993.8 \frac{m^3}{h}$$

Para Z20-21

$$Q_{TP4} = \frac{(\rho Q)_{TP1} - (\rho Q)_{TP5}}{\rho_{P4}} = \frac{\left(1 \frac{kg}{m^3}\right) \left(788 \frac{m^3}{h}\right) - \left(1 \frac{kg}{m^3}\right) \left(13.37 \frac{m^3}{h}\right)}{\left(1 \frac{kg}{m^3}\right)} = 774.63 \frac{m^3}{h}$$

Por la concentración de sólidos determinadas en las diferentes corrientes, se calcula la corriente de lodos en cada caudal.

Para Z21-22

$$Q_{LBS_{P1}} = Q_{TP1} * C_{SST_{P1}} = \left(1020 \frac{m^3}{h}\right) (0.0084) = 8.60 \frac{m^3}{h}$$

$$Q_{LBS_{P5}} = Q_{TP5} * (1 - \%Humedad) = \left(26.2 \frac{m^3}{h}\right) (1 - 0.7605) = 6.27 \frac{m^3}{h}$$

$$Q_{LBS_{P4}} = Q_{TP4} * C_{SST_{P4}} = \left(993.8 \frac{m^3}{h}\right) \left(\frac{17.64}{10000 * 100}\right) = 0.01753 \frac{m^3}{h}$$

Para Z20-21

$$Q_{LBS_{P1}} = Q_{TP1} * C_{SST_{P1}} = \left(788 \frac{m^3}{h}\right) (0.0078) = 6.17 \frac{m^3}{h}$$

$$Q_{LBS_{P5}} = Q_{TP5} * (1 - \%Humedad) = \left(13.37 \frac{m^3}{h}\right) (1 - 0.8117) = 2.52 \frac{m^3}{h}$$

$$Q_{LBS_{P4}} = Q_{TP4} * C_{SST_{P4}} = \left(774.63 \frac{m^3}{h}\right) \left(\frac{46.18}{10000 * 100}\right) = 0.036 \frac{m^3}{h}$$

C.2. Balance de materia en el clarificador

El caudal desconocido en el clarificador es la corriente de agua filtrada (corriente #2). Se tiene:

$$Q_{P2} = \frac{(\rho Q)_{P3} + (\rho Q)_{P4}}{\rho_{P2}}$$

Para Z21-22

$$Q_{P2} = \frac{\left(1 \frac{kg}{m^3}\right) \left(105 \frac{m^3}{h}\right) + \left(1 \frac{kg}{m^3}\right) \left(993.8 \frac{m^3}{h}\right)}{\left(1 \frac{kg}{m^3}\right)} = 1098.80 \frac{m^3}{h}$$

Para Z20-21

$$Q_{P2} = \frac{\left(1 \frac{kg}{m^3}\right) \left(105 \frac{m^3}{h}\right) + \left(1 \frac{kg}{m^3}\right) \left(774.63 \frac{m^3}{h}\right)}{\left(1 \frac{kg}{m^3}\right)} = 879.63 \frac{m^3}{h}$$

Apéndice D. Determinación de dosis óptima de floculante

D.1. Determinación de carga superficial

La carga superficial se calculó utilizando el área superficial del clarificador

Para determinar la carga superficial, se calculó el área superficial del clarificador utilizando la ecuación de área para círculos, debido a la estructura del tanque. El diámetro del equipo es de 8 m.

$$A_{Sup} = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi (8 \text{ m})^2}{4} = 50.27 \text{ m}^2$$

Utilizando la ecuación 4.21, se calculó la carga superficial:

$$CS = \frac{1098.8 \frac{m^3}{h}}{50.27 \text{ m}^2} = 21.86 \frac{m}{h} = 36.43 \frac{cm}{min}$$

Al obtenerse la carga superficial, se determinó la velocidad de sedimentación teórica esperada por el Ingenio San Antonio, utilizando el criterio expuesto en la ecuación 4.22

$$V_s = 65.58 \text{ a } 131.16 \frac{m}{h} = 109.3 \text{ a } 218.4 \frac{cm}{min}$$

D.2. Preparación de floculante

La concentración de floculante se calculó utilizando la siguiente ecuación:

$$C_{N-7128} = \frac{m_{N-7128}}{m_{H_2O}} * 100$$

$$C_{N-7128} = \frac{1g}{1000g} * 100 = \boxed{0.1\%}$$

D.3. Hoja de datos de seguridad de floculante N-7128



HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD

OPTIMER™ 7128

SECCIÓN 1. IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO Y DE LA COMPAÑÍA

| | |
|--------------------------------|--|
| Nombre del producto | : OPTIMER™ 7128 |
| Otros medios de identificación | : No aplicable |
| Restricciones de uso | : Consulte la documentación del producto o consulte a su representante de ventas local para restricciones de uso y los límites de dosis. |
| Empresa | : Ecolab Colombia S.A. Avenida Carrera 60 # 22-75 Parque Industrial Frapel Interior 5, 6 y 7 Bogotá Colombia TEL: 01 8000-120020 |
| Teléfono de emergencia | : CISPROQUIM® (24 horas) Teléfonos: 2886012 (Bogotá) 018000916012 (Colombia) 1800-59-3005 (Ecuador) |
| Fecha de emisión | : 11.02.2020 |

SECCIÓN 2: Identificación de los peligros

Clasificación SGA

| | |
|---|----------------|
| Irritación ocular | : Categoría 2B |
| Peligro a corto plazo (agudo) para el medio ambiente acuático | : Categoría 2 |

Elemento de etiquetado SGA

| | |
|------------------------|--|
| Palabra de advertencia | : Atención |
| Indicación de peligro | : Causa irritación a los ojos. Tóxico para los organismos acuáticos. |
| Consejos de prudencia | : Prevención: Lavarse la piel concienzudamente tras la manipulación. Evitar su liberación al medio ambiente. Intervención: EN CASO DE CONTACTO CON LOS OJOS: Enjuagar con agua cuidadosamente durante varios minutos. Quitar las lentes de contacto cuando estén presentes y pueda hacerse con facilidad. Proseguir con el lavado. Si persiste la irritación ocular: Consultar a un médico. Almacenamiento: Almacenar conforme a las regulaciones locales. Eliminación: Eliminar el contenido/ el recipiente en una planta de eliminación de residuos autorizada. |

| | |
|----------------|--|
| Otros peligros | : Mezclar muy bien antes de usar. Si se ingiere, durante la digestión se forma una masa gelatinosa que puede causar obstrucción. El agua en contacto con el producto puede hacer resbaladizo el suelo. |
|----------------|--|

| | |
|---------|-----------------------------|
| Aspecto | : Líquido |
| Color | : crema |
| Olor | : similar a un hidrocarburo |

HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD

OPTIMER™ 7128

SECCIÓN 3: Composición/información sobre los componentes

| | | |
|-------------------------------------|------------|-------------------|
| Sustancia pura/mezcla | : | Mezcla |
| Nombre químico | No. CAS | Concentración (%) |
| Polímero modificado de acrilamida | Patentado | 10 - 30 |
| Destilado de hidrocarburo liviano | 64742-47-8 | 10 - 30 |
| Sal inorgánica | Patentado | 1 - 5 |
| Alcohol oxialquilado | Patentado | 1 - 5 |
| Monostearato etoxilado de sorbitano | 9005-67-8 | 1 - 5 |

SECCIÓN 4: Primeros auxilios

| | | |
|---|---|--|
| En caso de contacto con los ojos | : | Enjuagar con mucha agua. Consultar un médico si los síntomas aparecen. |
| En caso de contacto con la piel | : | Eliminar lavando con jabón y mucha agua. Consultar un médico si los síntomas aparecen. |
| En caso de ingestión | : | Enjuáguese la boca. Consultar inmediatamente un médico. |
| En caso de inhalación | : | Consultar un médico si los síntomas aparecen. |
| Protección de los socorristas | : | En caso de emergencia, evalúe el peligro antes de emprender una acción. No se ponga en riesgo de sufrir una lesión. En caso de duda, contacte con los servicios de emergencias. Utilizar el equipo de protección individual obligatorio. |
| Notas para el médico | : | Tratar sintomáticamente. Si se ingiere, durante la digestión se forma una masa gelatinosa que puede causar obstrucción. |
| Principales síntomas y efectos, agudos y retardados | : | Consulte la sección 11 para obtener información más detallada sobre los efectos en la salud y sus síntomas. |

SECCIÓN 5: Medidas de lucha contra incendios

| | | |
|--|---|---|
| Medios de extinción apropiados | : | Usar medidas de extinción que sean apropiadas a las circunstancias del local y a sus alrededores. |
| Medios de extinción no apropiados | : | No use agua a menos de que se disponga de grandes cantidades. |
| Peligros específicos en la lucha contra incendios | : | La separación de una fase del producto puede ocurrir después de prolongado almacenamiento. La fase superior será disolvente hidrocarburo combustible. |
| Productos de combustión peligrosos | : | Los productos de descomposición pueden incluir los siguientes materiales: Óxidos de carbono Óxidos de nitrógeno (NOx) Óxidos de azufre Óxidos de fósforo |
| Equipo de protección especial para el personal de lucha contra incendios | : | Utilícese equipo de protección individual. |
| Métodos específicos de extinción | : | El agua de extinción debe recogerse por separado, no debe penetrar en el alcantarillado. Los restos del incendio y el agua de extinción contaminada deben eliminarse según las normas locales en vigor. En caso de incendio o de explosión, no respire los humos. |

HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD

OPTIMER™ 7128

SECCIÓN 6: Medidas en caso de vertido accidental

| | |
|--|--|
| Precauciones personales, equipo de protección y procedimientos de emergencia | : Asegurar que la limpieza sea llevada a cabo únicamente por personal entrenado. Los derrames de este producto hacen resbaladizo el piso. Consultar las medidas de protección indicadas. |
| Precauciones relativas al medio ambiente | : No permitir el contacto con el suelo, la superficie o con las aguas subterráneas. |
| Métodos y material de contención y de limpieza | : Detener la fuga, si no hay peligro en hacerlo. Contener el derrame y recogerlo con material absorbente que no sea combustible (p. ej. arena, tierra, tierra de diatomeas, vermiculita) y depositarlo en un recipiente para su eliminación de acuerdo con la legislación local y nacional (ver sección 13). Elimine los restos con agua. En grandes derrames, canalizar el material derramado o retenerlo para evitar que la fuga no alcanza el agua corriente. |
| Recuperación | : Sin datos disponibles |
| Neutralización | : Sin datos disponibles |
| Disposición final | : Sin datos disponibles |

SECCIÓN 7: Manipulación y almacenamiento

| | |
|---------------------------------------|---|
| Consejos para una manipulación segura | : Evítase el contacto con los ojos y la piel. Lavarse las manos concienzudamente tras la manipulación. Utilizar solamente con una buena ventilación. AGITAR BIEN ANTES DE USARLO |
| Condiciones para el almacenaje seguro | : Mantener fuera del alcance de los niños. Mantener el recipiente herméticamente cerrado. Almacenar en recipientes adecuados y etiquetados. Almacenar lejos de oxidantes. Proteger este producto de la congelación. |

SECCIÓN 8: Controles de exposición/protección individual

Componentes con valores límite ambientales de exposición profesional.

| Componentes | No. CAS | Forma de exposición | Concentración permisible | Base |
|-------------------------------------|------------|---------------------|--------------------------|--------|
| Destilado de hidrocarburo liviano | 64742-47-8 | GV (neblina) | 5 mg/m3 | AR OEL |
| | | CMP - CPT (neblina) | 10 mg/m3 | AR OEL |
| Monostearato etoxilado de sorbitano | 9005-67-8 | GV | 10 mg/m3 | AR OEL |
| Destilado de hidrocarburo liviano | 64742-47-8 | TWA (neblina) | 5 mg/m3 | PE OEL |
| | | STEL (neblina) | 10 mg/m3 | PE OEL |
| Monostearato etoxilado de sorbitano | 9005-67-8 | TWA | 10 ppm | PE OEL |
| Destilado de hidrocarburo liviano | 64742-47-8 | L-8/40 (neblina) | 5 mg/m3 | VE OEL |
| | | LB (neblina) | 10 mg/m3 | VE OEL |
| Monostearato etoxilado de sorbitano | 9005-67-8 | L-8/40 | 10 mg/m3 | VE OEL |

HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD

OPTIMER™ 7128

| | | | | |
|-------------------------------------|------------|---------------------------|---|-------------------|
| Monostearato etoxilado de sorbitano | 9005-67-8 | VLE-PPT | 10 mg/m3 | NOM-010-STPS-2014 |
| Destilado de hidrocarburo liviano | 64742-47-8 | TWA | 500 ppm 2.000 mg/m3 | OSHA Z1 |
| | | TWA | 200 mg/m3 (vapor total de hidrocarburos) | ACGIH |
| | | TWA (neblina) | 5 mg/m3 | OSHA Z1 |
| | | TWA (neblina) | 5 mg/m3 | NIOSH REL |
| | | STEL (neblina) | 10 mg/m3 | NIOSH REL |
| Monostearato etoxilado de sorbitano | 9005-67-8 | TWA (fracción inhalable) | 10 mg/m3 | ACGIH |
| | | TWA (fracción respirable) | 3 mg/m3 | ACGIH |

Medidas de ingeniería : Una ventilación usual debería ser suficiente para controlar la exposición del obrero a los contaminantes aerotransportados.

Protección personal

Protección de los ojos : Gafas de seguridad

Protección de las manos : Llevar guantes de protección.

Protección de la piel : Usar indumentaria de protección adecuada.

Protección respiratoria : Normalmente no requiere el uso de un equipo de protección individual respiratorio.

Medidas de higiene : Manipular con las precauciones de higiene industrial adecuadas, y respetar las prácticas de seguridad. Quitar y lavar la ropa contaminada antes de reutilizar. Lavarse la cara, las manos y toda la piel expuesta, concienzudamente tras la manipulación.

Las recomendaciones sobre el Equipo de Protección Individual (EPI) proporcionadas anteriormente se han hecho de buena fe y se basan en las condiciones típicas de uso esperadas. La selección de los EPI siempre debe completarse con una evaluación de riesgos adecuada y de acuerdo con un programa de gestión de EPI.

SECCIÓN 9: Propiedades físicas y químicas

| | |
|---|---|
| Aspecto | : Líquido |
| Color | : crema |
| Olor | : similar a un hidrocarburo |
| Punto de inflamación | : > 93,3 °C, Método: ASTM D 93, (Sistema de) Copa Cerrada tipo Pensky-Martens |
| pH | : 2,75 - 6,34, (25 °C) |
| Umbral olfativo | : Sin datos disponibles |
| Punto de fusión/ punto de congelación | : PUNTO DE CONGELACIÓN: -17,1 °C |
| Punto inicial de ebullición e intervalo de ebullición | : 97 °C, Método: ASTM D 86 |
| Tasa de evaporación | : Sin datos disponibles |
| Inflamabilidad (sólido, gas) | : No aplicable |

HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD

OPTIMER™ 7128

| | |
|--|----------------------------------|
| Límite de explosión, superior | : Sin datos disponibles |
| Límite de explosión, inferior | : Sin datos disponibles |
| Presión de vapor | : Sin datos disponibles |
| Densidad relativa del vapor | : Sin datos disponibles |
| Densidad relativa | : 0,997 - 1,060, (25 °C), |
| Densidad | : 8,52 lb/gal |
| Solubilidad en agua | : emulsionable |
| Solubilidad en otros disolventes | : Sin datos disponibles |
| Coefficiente de reparto n-octanol/agua | : Sin datos disponibles |
| Temperatura de auto-inflamación | : Sin datos disponibles |
| Descomposición térmica | : Sin datos disponibles |
| Viscosidad, dinámica | : 200 - 1.100 mPa.s (25 °C) |
| Viscosidad, cinemática | : 202 mm ² /s (40 °C) |
| Peso molecular | : Sin datos disponibles |
| COV | : 24,5 %, 249,24 g/l |

SECCIÓN 10: Estabilidad y reactividad

| | |
|--|---|
| Reactividad | : No se conoce reacciones peligrosas bajo condiciones de uso normales. |
| Estabilidad química | : Estable en condiciones normales. |
| Posibilidad de reacciones peligrosas | : No se conoce reacciones peligrosas bajo condiciones de uso normales. |
| Condiciones que deben evitarse | : Ninguna conocida. |
| Materiales incompatibles | : La adición de agua forma geles. El contacto con oxidantes fuertes (por ej. cloro, peróxidos, cromatos, ácido nítrico, perclorato, oxígeno concentrado, permanganatos) puede generar calor, fuego, explosiones y/o vapores tóxicos. |
| Productos de descomposición peligrosos | : En caso de incendio, pueden formarse productos peligrosos de descomposición, como: Óxidos de carbono Óxidos de nitrógeno (NO _x) Óxidos de azufre Óxidos de fósforo |

SECCIÓN 11: Información toxicológica

| | |
|---|---|
| Información sobre posibles vías de exposición | : Inhalación, Contacto con los ojos, Contacto con la piel |
|---|---|

Efectos potenciales para la Salud

| | |
|------|---------------------------------------|
| Ojos | : Provoca una irritación en los ojos. |
|------|---------------------------------------|

HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD

OPTIMER™ 7128

| | | |
|--------------------|---|--|
| Piel | : | No son conocidos ni esperados daños para la salud en condiciones normales de uso. |
| Ingestión | : | Si se ingiere, durante la digestión se forma una masa gelatinosa que puede causar obstrucción. |
| Inhalación | : | No son conocidos ni esperados daños para la salud en condiciones normales de uso. |
| Exposición Crónica | : | No son conocidos ni esperados daños para la salud en condiciones normales de uso. |

Experiencia con exposición de seres humanos

| | | |
|-----------------------|---|-------------------------------------|
| Contacto con los ojos | : | Rojez, Irritación |
| Contacto con la piel | : | Ningún síntoma conocido o esperado. |
| Ingestión | : | Ningún síntoma conocido o esperado. |
| Inhalación | : | Ningún síntoma conocido o esperado. |

Toxicidad

Producto

| | | |
|---|---|---|
| Toxicidad oral aguda | : | DL50 Conejo: > 5.000 mg/kg Sustancia test: Producto similar Estimación de la toxicidad aguda: > 5.000 mg/kg |
| Toxicidad aguda por inhalación | : | Sin datos disponibles |
| Toxicidad cutánea aguda | : | Estimación de la toxicidad aguda: > 5.000 mg/kg |
| Corrosión o irritación cutáneas | : | Resultado: 1.1 Método: Prueba de Draize Sustancia test: Producto similar |
| Lesiones o irritación ocular graves | : | Resultado: Ligera irritación en los ojos |
| Sensibilización respiratoria o cutánea | : | Sin datos disponibles |
| Carcinogenicidad | : | Sin datos disponibles |
| Efectos reproductivos | : | Sin datos disponibles |
| Mutagenicidad en células germinales | : | Sin datos disponibles |
| Teratogenicidad | : | Sin datos disponibles |
| Toxicidad específica en determinados órganos (STOT) - exposición única | : | Sin datos disponibles |
| Toxicidad específica en determinados órganos (STOT) - exposición repetida | : | Sin datos disponibles |
| Toxicidad por aspiración | : | Sin datos disponibles |

Componentes

HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD

OPTIMER™ 7128

Toxicidad aguda por inhalación : Polímero modificado de acrilamida
CL50 Rata: > 20 mg/l
Tiempo de exposición: 4 h
Prueba de atmosfera: polvo/niebla

Alcohol oxialquilado
CL50 Rata: > 50 mg/l
Tiempo de exposición: 4 h
Prueba de atmosfera: polvo/niebla

Monostearato etoxilado de sorbitano
CL50: 127,56 mg/l
Prueba de atmosfera: polvo/niebla

SECCIÓN 12: Información ecológica

Ecotoxicidad

Efectos Ambientales : Tóxico para los organismos acuáticos.

Producto

Toxicidad para los peces : CL50 Pimephales promelas (Piscardo de cabeza gorda): 34,2 mg/l
Tiempo de exposición: 96 hora
Sustancia test: El producto fue evaluado en agua limpia

CL50 Lepomis macrochirus (Pez-luna Blugill): 13,4 mg/l
Tiempo de exposición: 96 hora
Sustancia test: El producto fue evaluado en agua limpia

CL50 Cyprinodon variegatus: > 1.000 mg/l
Tiempo de exposición: 96 hora
Sustancia test: El producto fue evaluado en agua limpia

NOEC Pimephales promelas (Piscardo de cabeza gorda): 12,5 mg/l
Tiempo de exposición: 96 hora
Sustancia test: El producto fue evaluado en agua limpia

NOEC Lepomis macrochirus (Pez-luna Blugill): 5 mg/l
Tiempo de exposición: 96 hora
Sustancia test: El producto fue evaluado en agua limpia

Toxicidad para las dafnias y otros invertebrados acuáticos. : CE50 Daphnia magna (Pulga de mar grande): 10 - 100 mg/l
Tiempo de exposición: 48 hora
Sustancia test: Polímero representativo examinado en agua con DOC

NOEC Daphnia magna (Pulga de mar grande): 0,5 mg/l
Tiempo de exposición: 48 hora
Sustancia test: El producto fue evaluado en agua limpia

Toxicidad para las algas : Sin datos disponibles

Componentes

Toxicidad para las algas : Destilado de hidrocarburo liviano
CE50 : > 1.000 mg/l
Tiempo de exposición: 72 h

HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD

OPTIMER™ 7128

Monostearato etoxilado de sorbitano
CE50 : 52,606 mg/l
Tiempo de exposición: 72 h

Componentes

Toxicidad para las bacterias : Destilado de hidrocarburo liviano
> 1.000 mg/l
Tiempo de exposición: 48 h

Persistencia y degradabilidad

Demanda química de oxígeno (DQO): 276.579 mg/l

Demanda bioquímica de oxígeno (DBO):

| Periodo de Incubación | Valor | Sustancia examinada |
|-----------------------|--------------|---------------------|
| 5 d | 104.276 mg/l | Producto |

Movilidad

Sin datos disponibles

Potencial de bioacumulación

Sin datos disponibles

Otra información

Sin datos disponibles

SECCIÓN 13: Consideraciones relativas a la eliminación

Métodos de eliminación. : No se debe permitir que el producto penetre en los desagües, tuberías, o la tierra (suelos). Donde sea posible, es preferible el reciclaje en vez de la deposición o incineración. Si no se puede reciclar, elimínese conforme a la normativa local. Eliminación de los residuos en plantas autorizadas de eliminación de residuos.

Consideraciones relativas a la eliminación : Eliminar como producto no usado. Los contenedores vacíos deben ser llevados a un lugar autorizado de gestión de residuos, para el reciclado o eliminación. No reutilizar los recipientes vacíos.

SECCIÓN 14: Información relativa al transporte

El transportista/consignatario/remiteante es responsable de garantizar que el embalaje, etiquetado y el marcado es el adecuado para el modo de transporte seleccionado.

Transporte por carretera: en general es aplicable para el transporte en Colombia.

Designación oficial de transporte de las Naciones Unidas : EL PRODUCTO NO ESTÁ REGULADO DURANTE SU TRANSPORTE

Transporte aéreo (IATA)

HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD

OPTIMER™ 7128

Designación oficial de transporte de las Naciones Unidas : EL PRODUCTO NO ESTÁ REGULADO DURANTE SU TRANSPORTE

Transporte marítimo (IMDG/IMO)

Designación oficial de transporte de las Naciones Unidas : EL PRODUCTO NO ESTÁ REGULADO DURANTE SU TRANSPORTE

SECCIÓN 15: Información reglamentaria

Nuestra MSDS cumple con los requisitos establecidos por la Norma Técnica Colombiana 4435 y por la Norma Técnica Colombiana 1692

ADMINISTRACIÓN DE ALIMENTOS Y DROGAS (FDA) Ley Federal de Alimentos, Drogas y Cosméticos : Cuando debido a las circunstancias de uso se requiera cumplir con las reglamentaciones FDA, este producto es aceptable bajo : 21 CFR 176.170 Componentes de papel y cartón en contacto con alimentos acuosos y grasos, y 21CFR 176.180 Componentes de papel y cartón en contacto con alimentos secos.

Para uso solamente como auxiliar de retención y drenaje empleado antes de la operación del formado de hoja en la fabricación de papel y cartón y limitado para su uso en un nivel que no exceda 0.15 % en peso del papel y cartón terminado (como activo). Limitación 176.170 : La superficie final que contacta alimento debe cumplir con las limitaciones extractivas como está subrayado en 176.170(c). El papel y cartón fabricados con este aditivo pueden utilizarse en contacto con todos los tipos de alimentos bajo las condiciones de uso A-H y J tal como descrito en 21 CFR 176.170(c), Tablas 1 y 2.

SECCIÓN 16: Otra información

NFPA:



HMIS III:

| | |
|----------------|---|
| SALUD | 1 |
| INFLAMABILIDAD | 1 |
| PELIGRO FÍSICO | 0 |

0 = no significativo, 1 = Ligero,
2 = Mediano, 3 = Alto
4 = Extremo, * = Crónico

Fecha de revisión : 11.02.2020
Número De Versión : 1.3
Preparado por : Regulatory Affairs

INFORMACIÓN REVISADA: Los cambios importantes introducidos en las normativas o la información sanitaria como parte de esta revisión se indican mediante una barra en el margen izquierdo de la Hoja de datos de seguridad de materiales (MSDS).

La información proporcionada en esta Ficha de Datos de Seguridad, es la más correcta de que disponemos a la fecha de su publicación. La información suministrada, está concebida solamente como una guía para la

seguridad en el manejo, uso, procesado, almacenamiento, transporte, eliminación y descarga, y no debe ser considerada como una garantía o especificación de calidad. La información se refiere únicamente al material especificado, y no puede ser válida para dicho material, usado en combinación con otros materiales o en cualquier proceso, a menos que sea indicado en el texto.

Apéndice E. Pruebas de cilindro

E.1. Concentración de 0.67% SST en corriente #1

Para la concentración de 0.67% se tienen los siguientes resultados:

Tabla E.1 Comportamiento de la altura y velocidad de sedimentación respecto al tiempo a diferente dosificación de floculante para 0.67% SST

| Floculante a 0.5 ppm | | | | Floculante a 1 ppm | | | |
|----------------------|-----------------|------------|------------------|--------------------|-----------------|------------|------------------|
| t (s) | Δh (cm) | h_t (cm) | V_{sed} (cm/s) | t (s) | Δh (cm) | h_t (cm) | V_{sed} (cm/s) |
| 0 | 0 | 33.2 | - | 0 | 0 | 33.2 | - |
| 10 | 2.5 | 30.7 | 0.25 | 10 | 3 | 30.2 | 0.30 |
| 20 | 6 | 27.2 | 0.30 | 20 | 10.2 | 23 | 0.51 |
| 30 | 11.2 | 22 | 0.37 | 30 | 17.6 | 15.6 | 0.59 |
| 40 | 16.7 | 16.5 | 0.42 | 40 | 24.3 | 8.9 | 0.61 |
| 50 | 22.8 | 10.4 | 0.46 | 50 | 27.3 | 5.9 | 0.55 |
| 60 | 26.3 | 6.9 | 0.44 | 60 | 28.5 | 4.7 | 0.48 |
| 70 | 27.9 | 5.3 | 0.40 | 70 | 28.7 | 4.5 | 0.41 |
| 80 | 28.5 | 4.7 | 0.36 | 80 | 29.1 | 4.1 | 0.36 |
| 90 | 28.9 | 4.3 | 0.32 | 90 | 29.4 | 3.8 | 0.33 |

Tabla E.1 Comportamiento de la altura y velocidad de sedimentación respecto al tiempo a diferente dosificación de floculante para 0.67% SST (Continuación)

| Floculante a 1.15 ppm | | | | Floculante a 2 ppm | | | |
|-----------------------|-----------------|------------|------------------|--------------------|-----------------|------------|------------------|
| t (s) | Δh (cm) | h_t (cm) | V_{sed} (cm/s) | t (s) | Δh (cm) | h_t (cm) | V_{sed} (cm/s) |
| 0 | 0 | 33.2 | - | 0 | 0 | 33.2 | - |
| 10 | 3 | 30.2 | 0.30 | 10 | 3.2 | 30 | 0.32 |
| 20 | 7.4 | 25.8 | 0.37 | 20 | 6 | 27.2 | 0.30 |
| 30 | 15.7 | 17.5 | 0.52 | 30 | 10.2 | 23 | 0.34 |
| 40 | 22.1 | 11.1 | 0.55 | 40 | 14.3 | 18.9 | 0.36 |
| 50 | 27 | 6.2 | 0.54 | 50 | 20.5 | 12.7 | 0.41 |
| 60 | 28.3 | 4.9 | 0.47 | 60 | 25.1 | 8.1 | 0.42 |
| 70 | 29.2 | 4 | 0.42 | 70 | 27.1 | 6.1 | 0.39 |
| 80 | 29.4 | 3.8 | 0.37 | 80 | 28 | 5.2 | 0.35 |
| 90 | 29.8 | 3.4 | 0.33 | 90 | 28.6 | 4.6 | 0.32 |

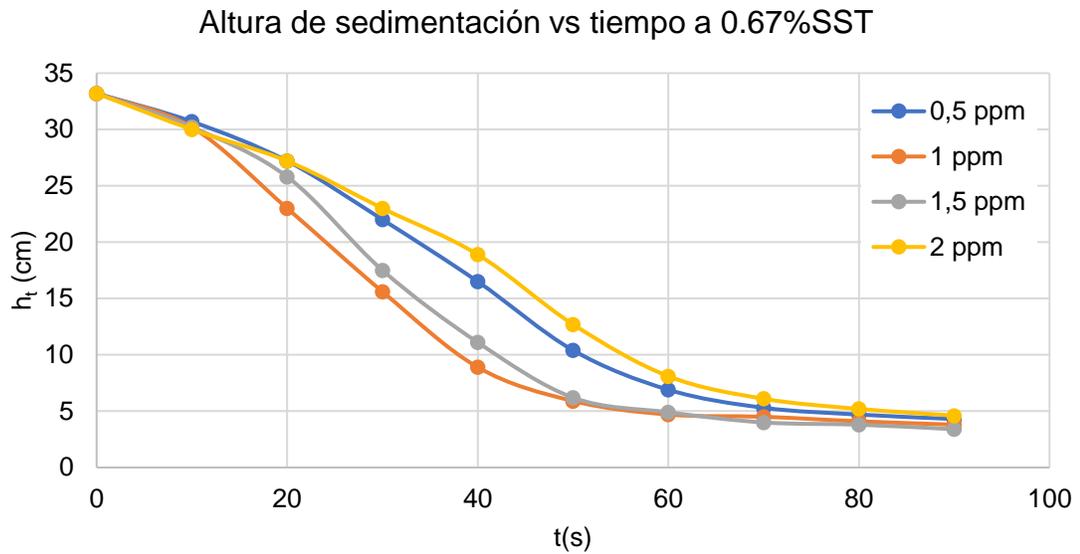


Figura E.1 Sedimentación de partículas a una carga de 0.67%SST respecto al tiempo para diferentes concentraciones de floculante

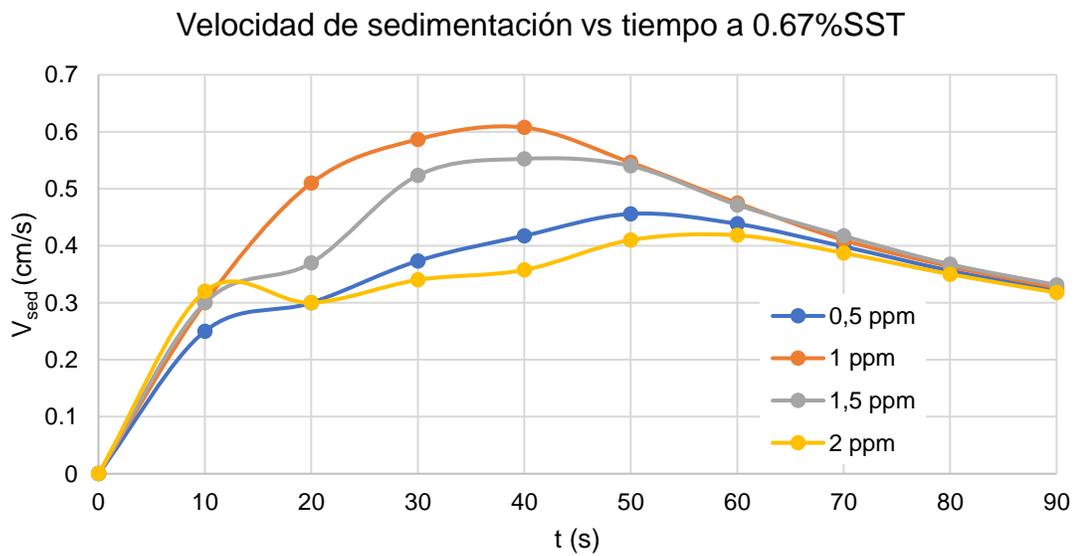


Figura E.2 Velocidad de sedimentación a una carga de 0.67% para diferentes concentraciones de floculante

E.2. Concentración de 0.83% SST en corriente #1

Para la concentración de 0.83% se tienen los siguientes resultados:

Tabla E.2 Comportamiento de la altura y velocidad de sedimentación respecto al tiempo a diferente dosificación de floculante para 0.83% SST

| Floculante a 0.5 ppm | | | | Floculante a 1ppm | | | |
|----------------------|-----------------|------------|------------------|-------------------|-----------------|------------|------------------|
| t (s) | Δh (cm) | h_t (cm) | V_{sed} (cm/s) | t (s) | Δh (cm) | h_t (cm) | V_{sed} (cm/s) |
| 0 | 0 | 33.2 | - | 0 | 0 | 33.2 | 0.00 |
| 10 | 2.9 | 30.3 | 0.29 | 10 | 4.1 | 29.1 | 0.41 |
| 20 | 7.1 | 26.1 | 0.36 | 20 | 11.4 | 21.8 | 0.57 |
| 30 | 12 | 21.2 | 0.40 | 30 | 20.6 | 12.6 | 0.69 |
| 40 | 17.1 | 16.1 | 0.43 | 40 | 27.3 | 5.9 | 0.68 |
| 50 | 22.1 | 11.1 | 0.44 | 50 | 29.8 | 3.4 | 0.60 |
| 60 | 22.7 | 10.5 | 0.38 | 60 | 30.7 | 2.5 | 0.51 |
| 70 | 23.6 | 9.6 | 0.34 | 70 | 30.9 | 2.3 | 0.44 |
| 80 | 25 | 8.2 | 0.31 | 80 | 31.1 | 2.1 | 0.39 |
| 90 | 27.5 | 5.7 | 0.31 | 90 | 31.3 | 1.9 | 0.35 |

Tabla E.2 Comportamiento de la altura y velocidad de sedimentación respecto al tiempo a diferente dosificación de floculante para 0.83% SST (Continuación)

| Floculante a 1.5 ppm | | | | Floculante a 2ppm | | | |
|----------------------|-----------------|------------|------------------|-------------------|-----------------|------------|------------------|
| t (s) | Δh (cm) | h_t (cm) | V_{sed} (cm/s) | t (s) | Δh (cm) | h_t (cm) | V_{sed} (cm/s) |
| 0 | 0 | 33.2 | - | 0 | 0 | 33.2 | - |
| 10 | 4.3 | 28.9 | 0.43 | 10 | 7.2 | 26 | 0.72 |
| 20 | 13.6 | 19.6 | 0.68 | 20 | 15.9 | 17.3 | 0.80 |
| 30 | 23.8 | 9.4 | 0.79 | 30 | 21.8 | 11.4 | 0.73 |
| 40 | 27.7 | 5.5 | 0.69 | 40 | 26 | 7.2 | 0.65 |
| 50 | 29.8 | 3.4 | 0.60 | 50 | 28.4 | 4.8 | 0.57 |
| 60 | 30.5 | 2.7 | 0.51 | 60 | 30.4 | 2.8 | 0.51 |
| 70 | 30.7 | 2.5 | 0.44 | 70 | 30.9 | 2.3 | 0.44 |
| 80 | 31 | 2.2 | 0.39 | 80 | 31.3 | 1.9 | 0.39 |
| 90 | 31.5 | 1.7 | 0.35 | 90 | 31.5 | 1.7 | 0.35 |

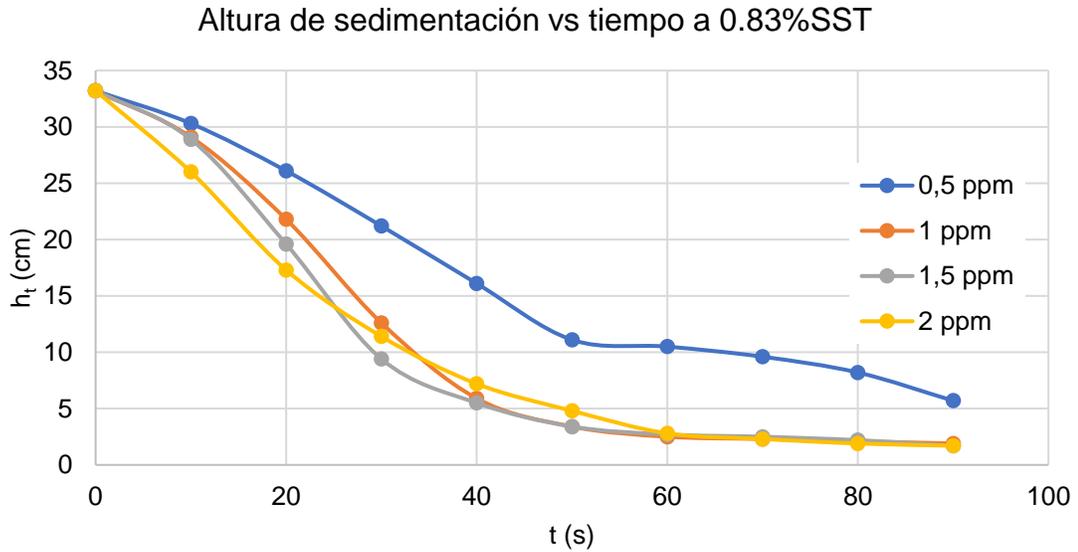


Figura E.3 Sedimentación de partículas a una carga de 0.83% respecto al tiempo para diferentes concentraciones de floculante

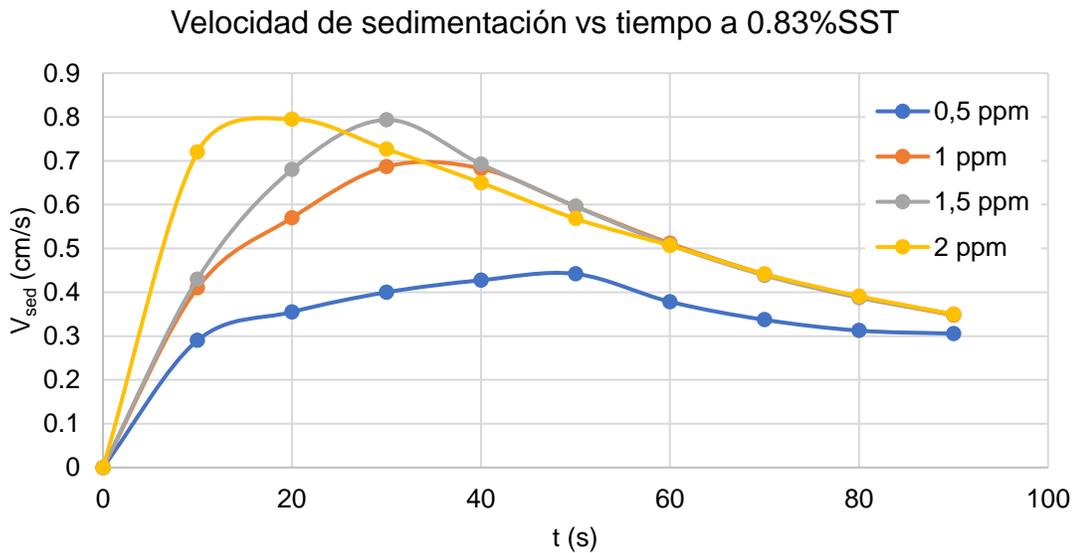


Figura E.4 Velocidad de sedimentación a una carga de 0.83% para diferentes concentraciones de floculante

E.3. Concentración de 1.10% SST en corriente #1

Para la concentración de 0.10% se tienen los siguientes resultados:

Tabla E.3 Comportamiento de la altura y velocidad de sedimentación respecto al tiempo a diferente dosificación de floculante para 1.10% SST

| Floculante a 0.5 ppm | | | | Floculante a 1ppm | | | |
|----------------------|-----------------|------------|------------------|-------------------|-----------------|------------|------------------|
| t (s) | Δh (cm) | h_t (cm) | V_{sed} (cm/s) | t (s) | Δh (cm) | h_t (cm) | V_{sed} (cm/s) |
| 0 | 0 | 33.2 | - | 0 | 0 | 33.2 | - |
| 10 | 3.2 | 30 | 0.32 | 10 | 4.3 | 28.9 | 0.43 |
| 20 | 7.8 | 25.4 | 0.39 | 20 | 15 | 18.2 | 0.75 |
| 30 | 13.2 | 20 | 0.44 | 30 | 24.6 | 8.6 | 0.82 |
| 40 | 17.5 | 15.7 | 0.44 | 40 | 31 | 2.2 | 0.78 |
| 50 | 20.9 | 12.3 | 0.42 | 50 | 31.3 | 1.9 | 0.63 |
| 60 | 22.9 | 10.3 | 0.38 | 60 | 31.6 | 1.6 | 0.53 |
| 70 | 25 | 8.2 | 0.36 | 70 | 31.7 | 1.5 | 0.45 |
| 80 | 26.1 | 7.1 | 0.33 | 80 | 31.8 | 1.4 | 0.40 |
| 90 | 26.6 | 6.6 | 0.30 | 90 | 31.9 | 1.3 | 0.35 |

Tabla E.3 Comportamiento de la altura y velocidad de sedimentación respecto al tiempo a diferente dosificación de floculante para 1.10% SST (Continuación)

| Floculante a 1.5 ppm | | | | Floculante a 2ppm | | | |
|----------------------|-----------------|------------|------------------|-------------------|-----------------|------------|------------------|
| t (s) | Δh (cm) | h_t (cm) | V_{sed} (cm/s) | t (s) | Δh (cm) | h_t (cm) | V_{sed} (cm/s) |
| 0 | 0 | 33.2 | - | 0 | 0 | 33.2 | - |
| 10 | 4.5 | 28.7 | 0.45 | 10 | 8.3 | 24.9 | 0.83 |
| 20 | 15.8 | 17.4 | 0.79 | 20 | 19 | 14.2 | 0.95 |
| 30 | 27.3 | 5.9 | 0.91 | 30 | 29.6 | 3.6 | 0.99 |
| 40 | 30.6 | 2.6 | 0.77 | 40 | 30 | 3.2 | 0.75 |
| 50 | 31 | 2.2 | 0.62 | 50 | 30.3 | 2.9 | 0.61 |
| 60 | 31.1 | 2.1 | 0.52 | 60 | 30.4 | 2.8 | 0.51 |
| 70 | 31.2 | 2 | 0.45 | 70 | 30.5 | 2.7 | 0.44 |
| 80 | 31.3 | 1.9 | 0.39 | 80 | 30.5 | 2.7 | 0.38 |
| 90 | 31.3 | 1.9 | 0.35 | 90 | 30.5 | 2.7 | 0.34 |

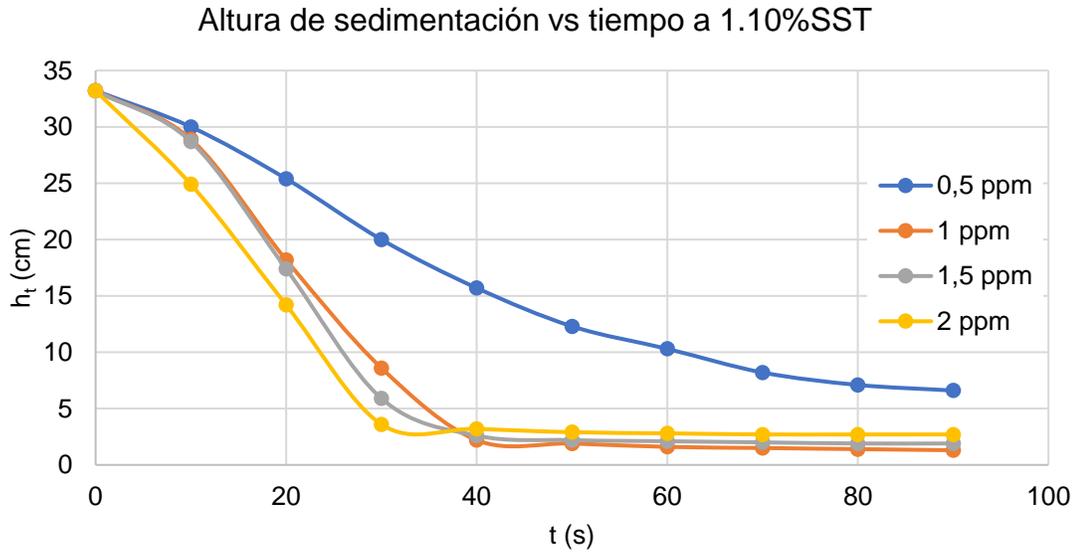


Figura E.5 Sedimentación de partículas a una carga de 1.10% respecto al tiempo para diferentes concentraciones de floculante

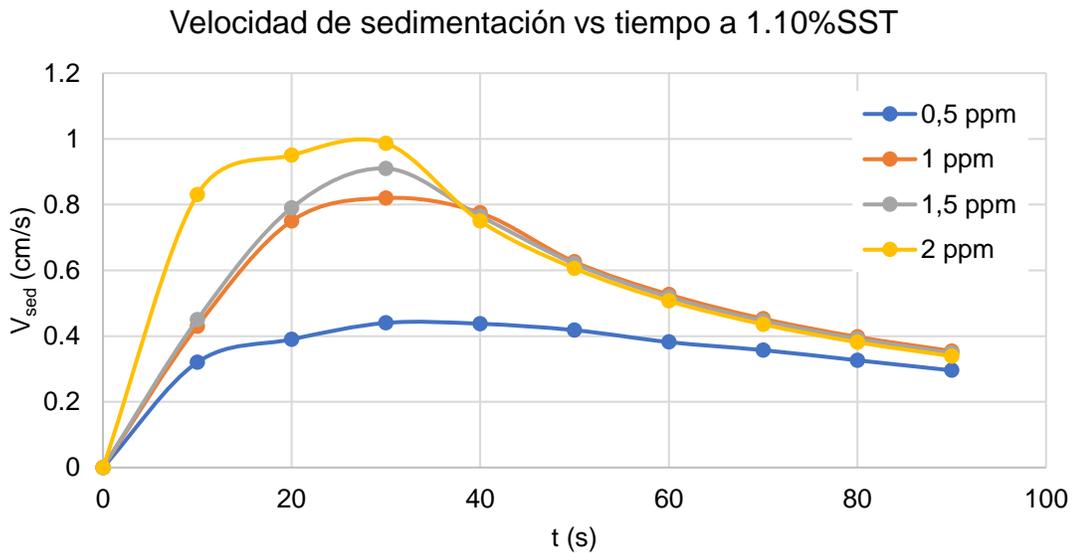


Figura E.6 Velocidad de sedimentación a una carga de 1.10% para diferentes concentraciones de floculante

E.4. Concentración de 1.16% SST en corriente #1

Para la concentración de 1.16% se tienen los siguientes resultados:

Tabla E.4 Comportamiento de la altura y velocidad de sedimentación respecto al tiempo a diferente dosificación de floculante para 1.16% SST

| Floculante a 0.5 ppm | | | | Floculante a 1ppm | | | |
|----------------------|-----------------|------------|------------------|-------------------|-----------------|------------|------------------|
| t (s) | Δh (cm) | h_t (cm) | V_{sed} (cm/s) | t (s) | Δh (cm) | h_t (cm) | V_{sed} (cm/s) |
| 0 | 0 | 33.2 | - | 0 | 0 | 33.2 | - |
| 10 | 1.4 | 31.8 | 0.14 | 10 | 2 | 31.2 | 0.20 |
| 20 | 5.8 | 27.4 | 0.29 | 20 | 6.3 | 26.9 | 0.32 |
| 30 | 13 | 20.2 | 0.43 | 30 | 14.5 | 18.7 | 0.48 |
| 40 | 17.1 | 16.1 | 0.43 | 40 | 22.5 | 10.7 | 0.56 |
| 50 | 21.4 | 11.8 | 0.43 | 50 | 30 | 3.2 | 0.60 |
| 60 | 26 | 7.2 | 0.43 | 60 | 30.3 | 2.9 | 0.51 |

Tabla E.4 Comportamiento de la altura y velocidad de sedimentación respecto al tiempo a diferente dosificación de floculante para 1.10% SST (Continuación)

| Floculante a 1.5 ppm | | | | Floculante a 2ppm | | | |
|----------------------|-----------------|------------|------------------|-------------------|-----------------|------------|------------------|
| t (s) | Δh (cm) | h_t (cm) | V_{sed} (cm/s) | t (s) | Δh (cm) | h_t (cm) | V_{sed} (cm/s) |
| 0 | 0 | 33.2 | - | 0 | 0 | 33.2 | - |
| 10 | 4 | 29.2 | 0.40 | 10 | 4.5 | 28.7 | 0.45 |
| 20 | 13 | 20.2 | 0.65 | 20 | 12 | 21.2 | 0.60 |
| 30 | 23 | 10.2 | 0.77 | 30 | 20.4 | 12.8 | 0.68 |
| 40 | 30 | 3.2 | 0.75 | 40 | 30.4 | 2.8 | 0.76 |
| 50 | 30.6 | 2.6 | 0.61 | 50 | 31.9 | 1.3 | 0.64 |
| 60 | 31 | 2.2 | 0.52 | 60 | 32.2 | 1 | 0.54 |

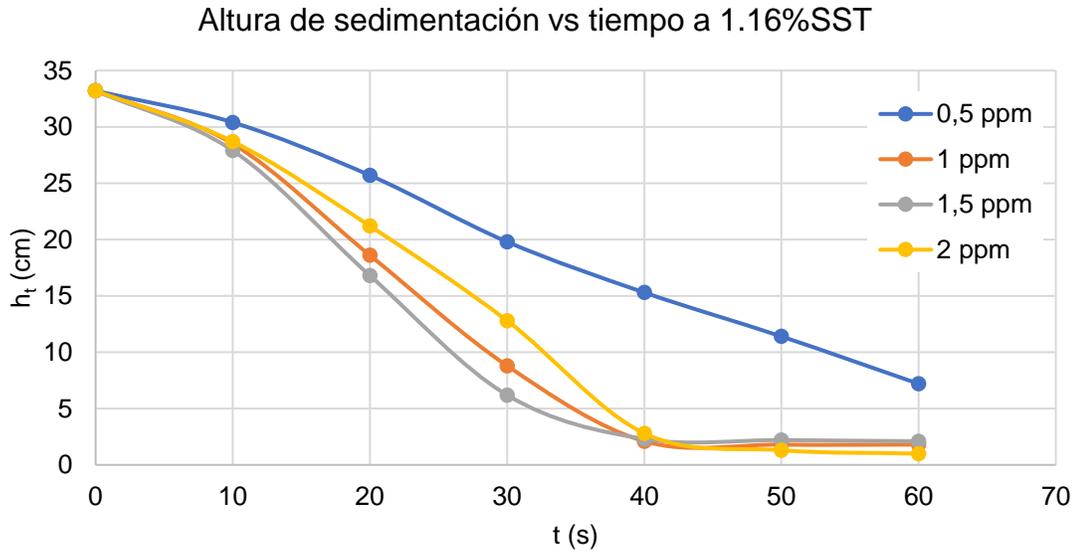


Figura E.7 Sedimentación de partículas a una carga de 1.16% respecto al tiempo para diferentes concentraciones de floculante

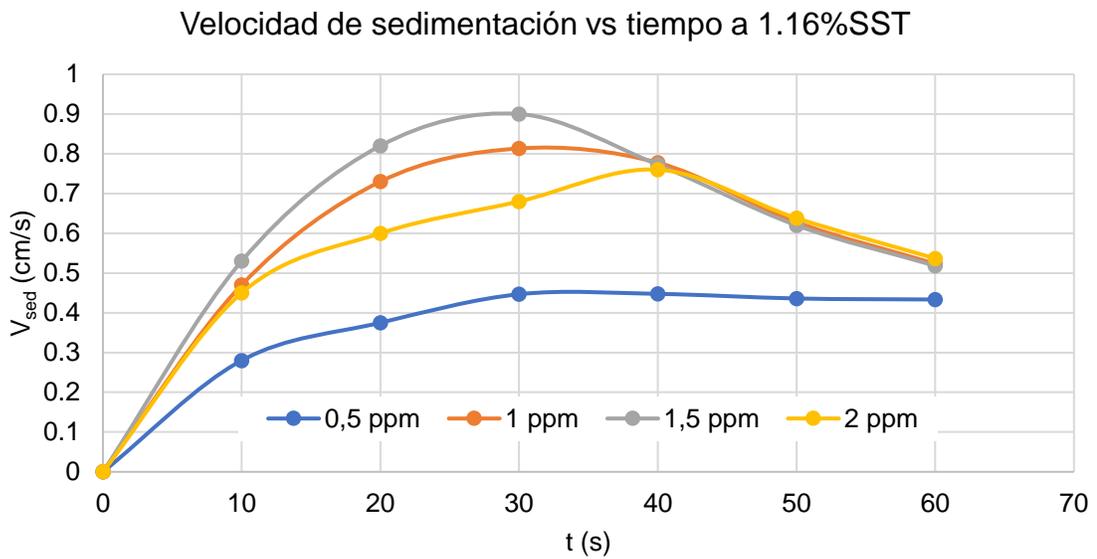


Figura E.8 Velocidad de sedimentación a una carga de 1.16% para diferentes concentraciones de floculante

Apéndice F. Determinación de la eficiencia del proceso

F.1. Eficiencia del filtro rotativo

La eficiencia del filtro está dada por la ecuación 4.22

$$\eta_{FIROT} = \frac{m_{SIP5}}{(m_{SIP1} + m_{SIP3})} * 100$$

Para Z21-22

$$\eta_{FIROT} = \frac{6.27}{(8.6 + 2.99)} * 100 = 54.1\%$$

Para Z20-21

$$\eta_{FIROT} = \frac{2.52}{(6.17 + 7.59)} * 100 = 18.29\%$$

F.2. Eficiencia del clarificador

La eficiencia del clarificador está dada por la ecuación 4.23

$$\eta_{CL} = \left(1 - \left(\frac{m_{SSTP4}}{m_{SSTP2}} \right) \right) * 100$$

Para Z21-22

$$\eta_{CL} = \left(1 - \left(\frac{0.01753 \frac{m^3}{h}}{3.01 \frac{m^3}{h}} \right) \right) * 100 = 99.42\%$$

Para Z20-21

$$\eta_{CL} = \left(1 - \left(\frac{0.036 \frac{m^3}{h}}{7.59 \frac{m^3}{h}} \right) \right) * 100 = 99.53\%$$

F.3. Eficiencia general de la planta

La eficiencia del filtro está dada por la ecuación 4.24.

$$\eta_{Planta} = \left(1 - \left(\frac{m_{SSTP4}}{m_{SSTP1}} \right) \right) * 100$$

Para Z21-22

$$\eta_{Planta} = \left(1 - \left(\frac{0.01753 \frac{m^3}{h}}{8.6 \frac{m^3}{h}} \right) \right) * 100 = 99.8\%$$

Para Z20-21

$$\eta_{Planta} = \left(1 - \left(\frac{0.036 \frac{m^3}{h}}{6.17 \frac{m^3}{h}} \right) \right) * 100 = 99.42\%$$

Se aplicó el factor de capacidad para cada Z21-22 y Z20-21, respectivamente

$$FC_{Z21-22} = \frac{Q_{Pi}}{Q_{Máx}} = \frac{788 \frac{m^3}{h}}{1100 \frac{m^3}{h}} * 100 = 71.64\%$$

$$FC_{Z20-21} = \frac{Q_{Pi}}{Q_{Máx}} = \frac{1020 \frac{m^3}{h}}{1100 \frac{m^3}{h}} * 100 = 92.73\%$$

Apéndice G. Detalle de costos e ingresos

G.1. Costos por consumo de floculante

El precio del floculante es de 7.95 \$ por kilogramo consumido. Entonces su costo por día es:

$$7.95 \frac{\$}{kg N - 7128} * 24.83 \frac{kg N - 7128}{dia} = 197.4 \frac{\$}{dia}$$

Debido a que se contabilizan 162 días de zafra, el consumo anual es:

$$197.4 \frac{\$}{dia} * 162 \frac{dias}{zafra} = 31\,978.557 \frac{\$}{zafra}$$

G.2. Ahorros por mantenimiento

Tabla G.1. Detalle de ahorro generado por reducción en periodicidad de mantenimiento de equipos

| Descripción | Costo unitario (\$) | Costo total (\$) | #Equipo |
|------------------------|---------------------|------------------|---------|
| Chimenea | \$40 000.00 | \$120 000.00 | 3 |
| Ventiladores inducidos | \$6 000.00 | \$72 000.00 | 12 |
| Ductos | \$15 000.00 | \$90 000.00 | 6 |

Tabla G.1. Detalle de ahorro generado por reducción en periodicidad de mantenimiento de equipos (Continuación)

| Periodicidad De Mantenimiento (Años) | Costo Anual Actual (\$) | Periodicidad Proyectada (Años) | Costo Anual Proyectado (\$) | Ahorro Anual (\$) |
|--------------------------------------|-------------------------|--------------------------------|-----------------------------|--------------------|
| 3 | \$40 000.00 | 4 | \$30 000.00 | \$10 000.00 |
| 0.5 | \$144 000.00 | 1 | \$72 000.00 | \$72 000.00 |
| 3 | \$30 000.00 | 4 | \$22 500.00 | \$7 500.00 |
| | | | | \$89 500.00 |

Apéndice H. Estado de resultado

Tabla H.1 Estado de resultados para la reingeniería en PTAC

| Año | 0 | 1 | 2 | 3 |
|-------------------------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| Ingresos totales (+) | | \$324 967.00 | \$346 885.60 | \$375 967.84 |
| Costos totales (-) | | \$287 341.10 | \$297 304.10 | \$310 523.30 |
| Depreciación LR (-) | | \$13 566.31 | \$13 566.31 | \$13 566.31 |
| Interés bancario (-) | | | | |
| Utilidad Bruta (Antes de impuestos) | | \$24 059.59 | \$36 015.19 | \$51 878.23 |
| IMI 30% (-) | | | | |
| Utilidad Neta | | \$24 059.59 | \$36 015.19 | \$51 878.23 |
| Depreciación LR (+) | | \$13 566.31 | \$13 566.31 | \$13 566.31 |
| Valor de salvamento (+) | | | | |
| Capital de trabajo (-) | | | | |
| Inversión total inicial (-) | \$60 058.75 | | | |
| Préstamo bancario (+) | | | | |
| Flujo neto efectivo | \$60 058.75 | \$37 625.90 | \$49 581.50 | \$65 444.54 |
| Flujo neto acumulado | \$60 058.75 | \$22 432.85 | \$27 148.65 | \$92 593.19 |

Tabla H.2. Cálculo de relación Beneficio-Costo

| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------|
| FNE/(1+i)^t | \$60 058.75 | \$32 718.17 | \$37 490.74 | \$43 030.85 | \$0.00 |
| Ingresos/(1+i)^t | | \$282 580.00 | \$262 295.35 | \$247 204.96 | \$0.00 |
| Costos/(1+i)^t | | \$249 861.83 | \$224 804.61 | \$204 174.11 | \$0.00 |
| VAN Beneficios | \$792 080.31 | VAN | \$53 181.01 | TMAR | 15% |
| VAN Costos | \$738 899.30 | B/C | 1.07 | PR | 2.41 |