



Universidad del Bío-Bío
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería en Maderas
Escuela Ingeniería Civil Química



CUANTIFICACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE CLORATO DE SODIO EN EL PROCESO DE GENERACIÓN DE DIÓXIDO DE CLORO EN UNA PLANTA DE CELULOSA

Informe de Habilitación Profesional presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de Ingeniero Civil Químico

DIEGO ANDRÉS CONTRERAS FLORES

Profesor Tutor: Dra. María Graciela Aguayo P.

Ingeniero Supervisor: Sr. Eduardo Pincheira D.

Concepción, Agosto de 2019

RESUMEN

La industria de celulosa está en constante búsqueda de optimizar sus procesos y adaptarse a las distintas condiciones exigidas por el entorno empresarial, estas condiciones se desarrollan en temas operacionales y en temas de mantención en cada área de trabajo.

Planta de generación de dióxido de cloro SVP-SCW® en una Planta de Celulosa ha aumentado su producción desde ■ ton/día, el cual es el valor de diseño, hasta 57 ton/día aproximadamente, adecuando ciertos equipos claves para que este aumento fuera posible.

En este trabajo de habilitación profesional, se realizó un estudio de cuantificación y optimización del uso de clorato de sodio para la generación de dióxido de cloro, reactivo que es utilizado en las etapas de blanqueo de la planta de celulosa. Analizando el proceso en relación a las entradas de reactivos al sistema, se realizaron distintos balances de masa para distintos rangos de producción, mediante el uso de *software* Wedge 8.0 y *software* IP21 (Aspen InfoPlus 21). Estos balances, permitieron evaluar la eficiencia y gasto de clorato de sodio para las producciones de 46, 48, 50 y 52 ton/día de dióxido de cloro, obteniendo eficiencias de 95,3%, 94,5%, 93,4% y 92,8% respectivamente.

En conjunto con análisis de laboratorio en los muestreos realizados en planta, se logró desarrollar un instructivo para la determinación de clorato de sodio en solución de dióxido de cloro, esto fue clave debido a la necesidad de realizar esta medición en el balance de masa, para obtener las pérdidas reales de la planta trabajando a rangos de producción predeterminados, diferenciando las pérdidas de clorato de la acumulación presente en el sistema de generación e identificando pérdidas que van desde 3,5 hasta 4,95 ton/día de clorato de sodio en la solución de dióxido de cloro.

Entre los principales resultados obtenidos se destaca la realización de una curva de eficiencia para planta de generación de dióxido de cloro, teniendo en cuenta lo obtenido por software y lo desarrollado en laboratorio, con esto, se demuestra la pérdida de eficiencia de la planta desde las 45 ton/día hasta llegar a las 57 ton/día de generación de dióxido de cloro. Esto afecta directamente al gasto económico de la empresa llevando pérdidas que van desde los USD \$911.278 hasta USD \$1.288.807 anuales.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Abel y Gladys, por el apoyo constante durante cada una de las etapas de mi vida.

A Megan, mi hermanita, por todos los momentos de alegría que me regala día a día.

A mi familia, amigos y amigas, que me acompañaron siempre durante mi proceso de formación, brindando permanente amor, apoyo y compañía en todo momento.

A Celulosa Arauco y Constitución S.A., que me dio la posibilidad de realizar este trabajo de Habilitación Profesional en [REDACTED], poniendo a disposición todos los recursos necesarios para el desarrollo de este trabajo.

A Eduardo, Joaquín y Alejandro, quienes compartieron sus conocimientos y buena onda a pesar de su gran carga laboral en la realización de este trabajo, supervisando con paciencia y dedicación en todo momento cuando lo necesité.

A todos los operadores de la Superintendencia de Fibra de [REDACTED], quienes ayudaron arduamente a entender gran parte el proceso de la planta y las dudas correspondientes que iban saliendo cada día.

A la Superintendencia de Procesos, que me acogió y dispuso de un puesto de trabajo para poder realizar la habilitación.

A todas y todos los laboratoristas de planta que permitieron el uso de su espacio de trabajo para las distintos ensayos de este estudio.

A María Graciela, mi profesora guía, quien me apoyó y me entregó su conocimiento y ayuda en la realización de este trabajo, no sólo en estos últimos meses, sino que en la formación académica en mis años de universidad.

A todos los profesores y personal de la Escuela de Ingeniería Civil Química, quienes entregaron su conocimiento para lograr mi formación.

A todas aquellas personas que indirectamente han formado parte de este proceso.

A todos, gracias.

TABLA DE CONTENIDOS

| | Página |
|--|--------|
| RESUMEN..... | i |
| AGRADECIMIENTOS..... | ii |
| TABLA DE CONTENIDOS..... | iii |
| NOMENCLATURA..... | vi |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | vii |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | ix |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 3 |
| 3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA..... | 5 |
| 3.1 Antecedentes generales de la empresa..... | 5 |
| 3.2 Producción de celulosa Kraft..... | 6 |
| 3.3 Etapas de blanqueo..... | 9 |
| 3.4 Planta de generación de dióxido de cloro..... | 11 |
| 4. OBJETIVOS..... | 19 |
| 4.1 Objetivo general..... | 19 |
| 4.2 Objetivos específicos..... | 19 |
| 5. METODOLOGÍA..... | 20 |
| 5.1 Recursos materiales y equipos..... | 21 |
| 5.2 Procedimiento..... | 22 |
| 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 26 |
| 6.1 Balance de masa con base de datos obtenidos en levantamiento de información..... | 26 |

| | |
|--|----|
| 6.2 Predicción de pérdida de clorato de sodio mediante balance de masa con respecto a análisis de laboratorio..... | 33 |
| 6.3 Análisis económico..... | 37 |
| 6.4 Estrategia operacional..... | 39 |
| 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 39 |
| 7.1 Conclusiones..... | 39 |
| 7.2 Recomendaciones..... | 40 |
| 8. REFERENCIAS..... | 41 |
| 9. ANEXOS..... | 42 |
| Anexo 1. Balances de masa para obtención de eficiencias y pérdidas de clorato según software filtrando por toneladas producidas de dióxido de cloro. | |
| Anexo 2. Balance específico para la obtención de pérdidas de clorato de sodio para una producción de 46 ton/día de dióxido de cloro. | |
| Anexo 3. Balance específico para la obtención de pérdidas de clorato de sodio para una producción de 48 ton/día de dióxido de cloro. | |
| Anexo 4. Balance específico para la obtención de pérdidas de clorato de sodio para una producción de 50 ton/día de dióxido de cloro. | |
| Anexo 5. Balance específico para la obtención de pérdidas de clorato de sodio para una producción de 52 ton/día de dióxido de cloro. | |
| Anexo 6. Resultados obtenidos de las mediciones en laboratorio. | |
| Anexo 7. Diagrama de balance de masa final para estudio de pérdidas de clorato de sodio para producción de 45 ton/día. | |
| Anexo 8. Diagrama de balance de masa final para estudio de pérdidas de clorato de sodio para producción de 46 ton/día. | |
| Anexo 9. Diagrama de balance de masa final para estudio de pérdidas de clorato de sodio para producción de 48 ton/día. | |
| Anexo 10. Diagrama de balance de masa final para estudio de pérdidas de clorato de sodio para producción de 50 ton/día. | |
| Anexo 11. Diagrama de balance de masa final para estudio de pérdidas de clorato de sodio para producción de 51 ton/día. | |
| Anexo 12. Diagrama de balance de masa final para estudio de pérdidas de clorato de sodio para producción de 52 ton/día. | |
| Anexo 13. Diagrama de balance de masa final para estudio de pérdidas de clorato de sodio para producción de 53 ton/día. | |

- Anexo 14. Diagrama de balance de masa final para estudio de pérdidas de clorato de sodio para producción de 55 ton/día.
- Anexo 15. Diagrama de balance de masa final para estudio de pérdidas de clorato de sodio para producción de 57 ton/día.
- Anexo 16. Instructivo de laboratorio para medición de clorato en solución de dióxido de cloro.
- Anexo 17. Toma de muestra en terreno.
- Anexo 18. Determinación clorato de sodio en laboratorio.

NOMENCLATURA

| | |
|---|---|
| ADt | <i>Air dried ton</i> |
| CH₃OH | Metanol |
| ClO₂ | Dióxido de cloro |
| ClO₃ | Clorato |
| D₀ | Etapas de deslignificación con dióxido de cloro |
| DCS | <i>Distributed Control System</i> |
| ECF | <i>Elemental Chlorine Free</i> |
| E_{OP} | Extracción alcalina con refuerzo de oxígeno y peróxido de hidrógeno |
| EPPs | Elementos de protección personal |
| H₂SO₄ | Ácido sulfúrico |
| ■ | ██ |
| ■ | ██ |
| NaClO₃ | Clorato de sodio |
| ■ | ██ |
| P&ID | <i>Piping and Instrumentation Diagram</i> |
| TK | Estanque de almacenamiento |
| TPD | Toneladas por día |
| 4Na₃H(SO₄)₂ | Sales de sesquisulfato |
| ton/día | toneladas por día |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Diagrama de bloques del proceso productivo de Planta de Celulosa..... | 6 |
| Figura 2. Imagen satelital de planta de Celulosa | 7 |
| Figura 3. Etapas de blanqueo en Planta de Celulosa..... | 10 |
| Figura 4. Comparación entre tecnologías SVP-SCW® (color verde) y SVP-LITE® en el proceso de producción de 1 tonelada de dióxido de cloro..... | 12 |
| Figura 5. Diagrama de bloques de área de descarga de clorato de sodio..... | 15 |
| Figura 6. Diagrama de bloques planta generación de dióxido de cloro..... | 18 |
| Figura 7. Diagrama de bloques utilizado para realizar el balance de masa..... | 20 |
| Figura 8. Puntos seleccionados para balance de masa de cloro en planta generadora de dióxido de cloro (indicados con flecha roja)..... | 21 |
| Figura 9. Secuencia de actividades clave realizadas para el desarrollo del trabajo..... | 22 |
| Figura 10. Curva de eficiencia planta generadora de dióxido de cloro, considerando cuatro puntos de producción..... | 27 |
| Figura 11. Línea de tendencia con modelo de regresión lineal para curva de eficiencia planta de dióxido de cloro..... | 27 |
| Figura 12. Balance de masa actual planta dióxido de cloro con producción de 46 ton/día..... | 29 |
| Figura 13. Balance de masa actual planta dióxido de cloro con producción de 48 ton/día..... | 29 |
| Figura 14. Balance de masa actual planta dióxido de cloro con producción de 50 ton/día..... | 29 |
| Figura 15. Balance de masa actual planta dióxido de cloro con producción de 52 ton/día..... | 30 |
| Figura 16. Balance de masa diseño planta dióxido de cloro con producción de 46 ton/día..... | 31 |
| Figura 17. Balance de masa diseño planta dióxido de cloro con producción de 48 ton/día..... | 31 |
| Figura 18. Balance de masa diseño planta dióxido de cloro con producción de 50 ton/día..... | 32 |
| Figura 19. Balance de masa diseño planta dióxido de cloro con producción de 52 ton/día..... | 32 |
| Figura 20. Balance de masa obtenido con mediciones de laboratorio para producción de 45 ton/día..... | 33 |
| Figura 21. Balance de masa obtenido con mediciones de laboratorio para producción de 46 ton/día..... | 33 |

| | |
|--|----|
| Figura 22. Balance de masa obtenido con mediciones de laboratorio para producción de 48 ton/día..... | 34 |
| Figura 23. Balance de masa obtenido con mediciones de laboratorio para producción de 50 ton/día..... | 34 |
| Figura 24. Balance de masa obtenido con mediciones de laboratorio para producción de 51 ton/día..... | 34 |
| Figura 25. Balance de masa obtenido con mediciones de laboratorio para producción de 52 ton/día..... | 35 |
| Figura 26. Balance de masa obtenido con mediciones de laboratorio para producción de 53 ton/día..... | 35 |
| Figura 27. Balance de masa obtenido con mediciones de laboratorio para producción de 55 ton/día..... | 35 |
| Figura 28. Balance de masa obtenido con mediciones de laboratorio para producción de 57 ton/día..... | 36 |
| Figura 29. Pérdida de clorato y acumulación para rangos de producción de 45 hasta 57 ton/día..... | 37 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Plantas de Celulosa, ubicación y capacidad instalada, correspondientes a empresa Arauco..... | 5 |
| Tabla 2. Producción de celulosa por tipo de producto en Adt de empresa Arauco..... | 5 |
| Tabla 3. Tecnologías y capacidades de plantas de celulosa de Arauco en TPD..... | 12 |
| Tabla 4. Consumos específicos de materias primas del proceso SVP-SCW® en toneladas..... | 14 |
| Tabla 5. Datos y características físicas del clorato de sodio..... | 15 |
| Tabla 6. Días de muestreo por cada mes de estudio..... | 23 |
| Tabla 7. Número de muestras y puntos de muestreos a considerar para realizar el balance de masa..... | 24 |
| Tabla 8. Levantamiento de información correspondiente a instrumentación necesaria para el balance de masa (TAGs para plataformas IP21, LAB21 y Wedge 8.0)..... | 24 |
| Tabla 9. Tabla resumen de datos generales obtenidos para determinar eficiencia de Planta generadora de ClO ₂ | 26 |
| Tabla 10. Eficiencias en la producción de dióxido de cloro obtenidas con el modelo de regresión lineal..... | 28 |
| Tabla 11. Tabla Resumen de Balance de masa con condiciones actuales de planta dióxido de cloro..... | 30 |
| Tabla 12. Tabla Resumen de Balance de masa con condiciones de diseño de planta dióxido de cloro..... | 32 |
| Tabla 13. Tabla de costos totales teniendo en cuenta eficiencias reales por toneladas de producción..... | 37 |
| Tabla 14. Pérdidas totales del año 2018 con relación a días de producción de acuerdo a intervalos seleccionados..... | 38 |
| Tabla 15. Pérdidas totales del año 2019 (Enero-Julio) con relación a días de producción de acuerdo a intervalos seleccionados..... | 38 |

1 INTRODUCCIÓN

ARAUCO es una de las mayores empresas forestales del mundo, ubicándose en diciembre de 2017, entre los mayores productores de celulosa de mercado a nivel mundial, ocupando un lugar relevante dentro de los productores de madera aserrada y paneles (CELCO 2017).

A nivel mundial, la mayor producción de celulosa química es obtenida a partir del proceso “Kraft”, donde en Chile, este tipo de industrias ha tenido un rol protagónico en las últimas décadas, transformándose en la principal fuente generadora de recursos del sector maderero. Esto se logra gracias a una constante modernización, optimización y mejora de procesos en esta área (Rivera 2012).

En la actualidad hay un gran desafío en las empresas de celulosa para llevar un control eficiente y constante de las operaciones que se desarrollan en las distintas áreas de proceso, y de esta manera satisfacer los requerimientos de los clientes. Diariamente ocurren cambios que influyen notoriamente en las actividades de una empresa, donde cada uno de sus componentes se deben ajustar a estos cambios, esto se hace cada año más exigente debido a que el entorno empresarial está en busca del mejoramiento continuo del punto de vista del proceso, de la seguridad y de los riesgos medio ambientales que esto involucre (Allison 2004).

Planta de Celulosa, perteneciente a Arauco, está situada en [REDACTED]. Esta planta posee [REDACTED] de celulosa blanqueada. [REDACTED]

[REDACTED] El producto final (fardos de celulosa), es obtenido con grados de blancura adecuados para su comercialización. En el proceso de obtención del producto final, específicamente el área de blanqueo de las pulpas, se requiere de reactivos para esta etapa, los que son obtenidos desde una planta generadora de dióxido de cloro que está situada al interior de [REDACTED].

Desde los años 90 las industrias de celulosa y papel han sustituido completamente el cloro elemental, por dióxido de cloro (ClO_2) en el blanqueo de la pulpa de celulosa. Sin embargo, existen algunos problemas que se pueden presentar en la generación de ClO_2 , estos son: la complejidad de reacciones de reactivos involucrados, tratamiento de los residuos generados,

control del proceso y la realización de las operaciones por parte de los trabajadores de planta consideradas de alto riesgo. Estos factores hacen que la generación de ClO_2 sea un producto crítico a considerar en las empresas de celulosa (Moraes 2016).

Una de las principales formas de reducir costos en cualquier planta generadora de dióxido de cloro es minimizar las pérdidas de reactivos y productos en su elaboración, este análisis se realiza mediante distintos balances de materia escogiendo distintos puntos de muestreo manipulando las distintas variables de proceso.

Actualmente, la planta generadora de dióxido de cloro ha aumentado su producción de \blacksquare ton/día (producción de diseño) a 57 ton/día, consecuencia del aumento de producción de celulosa a más de 1 millón de toneladas al año. Según la teoría de estequiometría, un aumento en la producción de dióxido de cloro genera un mayor requerimiento de clorato de sodio, lo que disminuye la eficiencia de la planta, generando la interrogativa del valor óptimo de producción.

En este contexto, esta Habilitación Profesional se enmarca en analizar y cuantificar el consumo de los reactivos utilizados en la elaboración de dióxido de cloro, específicamente el clorato de sodio, mediante balances de materia, desde que la materia prima es descargada a la planta, hasta que genera el dióxido de cloro y es utilizado en las etapas de blanqueo.

Este trabajo inicia con el planteamiento del problema, en el cual se detallan distintos factores que involucran el proceso, desde el punto de vista operacional de planta, luego continúa con la revisión bibliográfica de la empresa y del proceso en sí, definiendo los distintos equipos y tipos de tecnologías de operación, detallando el funcionamiento de la planta de generación de ClO_2 . En el capítulo 4 se presenta el objetivo general y los objetivos específicos de este estudio y en el capítulo 5 se informará la metodología, destacando los recursos utilizados (materiales y equipos) y el procedimiento realizado. En el capítulo 6 se presentan los principales resultados obtenidos y sus respectivas discusiones, finalmente se exponen las conclusiones y recomendaciones respectivas para la operación de la planta generadora de dióxido de cloro de Planta de Celulosa.

2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El dióxido de cloro es el agente blanqueador más utilizado en las etapas de blanqueo de pulpas de celulosa, ya que le da la blancura necesaria para satisfacer los requerimientos exigidos por los clientes y por las normas establecidas en el rubro.

Este agente blanqueador se produce *in-situ* en Planta de Celulosa, debido a que es explosivo bajo presión y difícil de transportar. El clorato de sodio es el principal reactivo utilizado en la elaboración de dióxido de cloro en conjunto con metanol y ácido sulfúrico. Se ha informado que existen pérdidas de clorato de sodio con el aumento de producción de dióxido de cloro, y que estas se pueden generar en distintos equipos y líneas del proceso. Actualmente, la planta no presenta un análisis cuantitativo de las pérdidas de clorato de sodio, considerando desde que este reactivo es descargado desde carros férreos por los volantes del área, hasta que se va incorporando en las distintas etapas del proceso para finalmente generar el dióxido de cloro que se utiliza en las distintas etapas de blanqueo de la pulpa (D_0 , D_1 y D_2). Con la recopilación de información de la planta, mediciones de laboratorio y mediante la ayuda de *software* de base de datos de la empresa, es posible realizar un análisis de pérdidas generadas en el proceso de generación de dióxido de cloro, que pueden ser identificadas mediante balances de masas globales y específicos.

El análisis de pérdida de clorato de sodio es un gran factor a considerar para la planta, ya que con este estudio es posible comparar como varía el rendimiento teórico, de acuerdo a las estequiometrias de reacción, con el rendimiento real de producción, considerando el aumento de producción de dióxido de cloro de ■ ton/día hasta 57 ton/día producidas actualmente. Estas pérdidas se pueden cuantificar económicamente pensando en un aumento de producción constante en el tiempo, analizando las relaciones de costos por cada rango de producción de dióxido de cloro establecido.

En resumen esta Habilitación Profesional desarrollará el estudio y análisis cuantitativo de clorato de sodio, principal reactivo en la generación de dióxido de cloro, detectando pérdidas que pueden estar presentes en las distintas etapas de generación del agente blanqueante y productos secundarios, las que pueden aumentar significativamente a medida que la producción de dióxido de cloro siga en aumento.

Una vez realizado el balance de masa y cálculos de pérdida de clorato de sodio, se procede a planificar una estrategia de control relacionada a la operación de la planta generadora de dióxido de cloro, para así poder controlar las pérdidas de clorato en sectores críticos del proceso. Con todo el levantamiento y análisis de la información del proceso en la elaboración de dióxido de cloro, se estimarán las pérdidas económicas. Con los resultados entregados a la empresa se espera ser un aporte en la búsqueda de mejoras de sus procesos en Planta de Celulosa.

3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1 Antecedentes generales de la empresa

Arauco posee 7 plantas de celulosa abarcando el rubro de la celulosa en Chile, Argentina y Uruguay (Tabla 1). En relación a la producción de celulosa por parte de Arauco, se destacan 3,7 millones de toneladas producidas en el año 2017 de celulosa blanqueada y sin blanquear de fibra larga correspondiente a pino, celulosa blanqueada de fibra corta de eucalipto y celulosa Fluff (Tabla 2). La celulosa producida en estas plantas es principalmente comercializada en Asia y Europa.

Planta de Celulosa perteneciente a Arauco, es una de las plantas [REDACTED] [REDACTED], con una capacidad productiva anual de [REDACTED] toneladas métricas de celulosa kraft blanqueada (CELCO, 2017).

Tabla 1. Plantas de Celulosa, ubicación y capacidad instalada, correspondientes a empresa Arauco (CELCO, 2017).

| Planta | Ubicación | Capacidad instalada |
|-------------------------|----------------------------------|---------------------|
| Planta Constitución | Constitución, Chile | 350.000 ADt/año |
| Planta Arauco | Arauco, Chile | 787.000 ADt/año |
| Planta Valdivia | San José de la Mariquina, Chile | 550.000 ADt/año |
| Planta Nueva Aldea | Ránquil, Chile | 1.030.000 ADt/año |
| Planta Licancel | Licantel, Chile | 150.000 ADt/año |
| Planta Alto Paraná | Provincia de Misiones, Argentina | 350.000 ADt/año |
| Planta Montes del plata | Conchillas, Uruguay | 700.000 ADt/año |

Tabla 2. Producción de celulosa por tipo de producto en Adt de empresa Arauco (CELCO, 2017).

| Producto | 2015 | 2016 | 2017 |
|----------------------|------------------|------------------|------------------|
| Pino Blanqueada | 1.422.139 | 1.531.089 | 1.441.910 |
| Eucalipto Blanqueada | 1.528.236 | 1.526.333 | 1.662.565 |
| Pino Cruda | 454.304 | 429.947 | 435.051 |
| Fluff | 198.460 | 208.129 | 155.153 |
| Total | 3.603.139 | 3.695.498 | 3.694.679 |

3.2 Producción de Celulosa Kraft

El proceso de pulpaje Kraft es el método más utilizado a nivel mundial por las empresas de celulosa, debido a que se diferencia de otros procesos, por ser altamente selectivo para aislar la celulosa, y además se logra la recuperación de sus químicos y la generación de energía (Peñaloza 2004).

En este proceso la madera en forma de rollizos es llevada por una serie de etapas de procesamiento para dar como producto final una hoja de celulosa que finalmente se vende en fardos de 250 kilogramos aproximadamente (Figura 1). Este producto se utiliza como materia prima para la fabricación de diversos productos, tales como: papeles de impresión y escrituras, cartones, embalajes, entre otros, es por esto que esta materia prima debe cumplir distintos requerimientos de acuerdo a las distintas normas existentes.

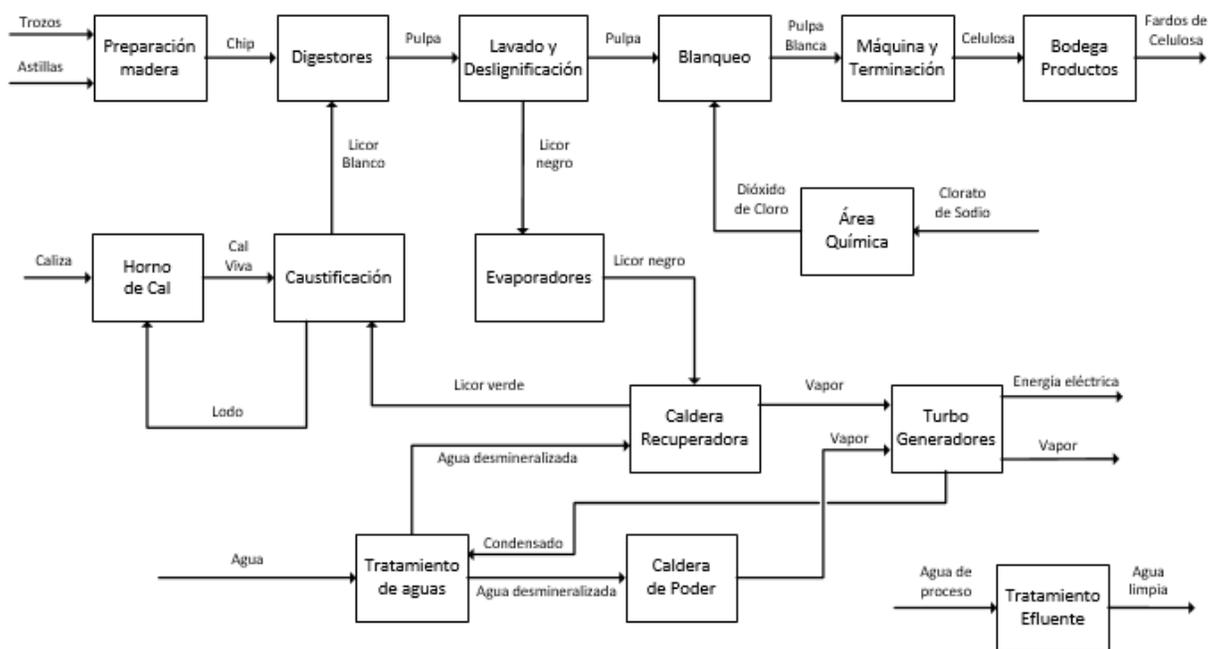


Figura 1. Diagrama de bloques del proceso productivo de Planta de Celulosa.

Como se puede ver en la Figura 1, el proceso Kraft consta de distintas áreas, estas son: el área de preparación maderas, área de licor, área de caustificación, área de fibra, área de máquina, área de efluentes y área de planta térmica, las cuales están a cargo de las operaciones y el mantenimiento de los equipos pertenecientes a su área de trabajo (Arauco 2011).

En Planta de Celulosa (Figura 2), existen ■ líneas de producción, ■ correspondiente a ■ como materia prima y por otro lado, ■ que utiliza como materia prima ■

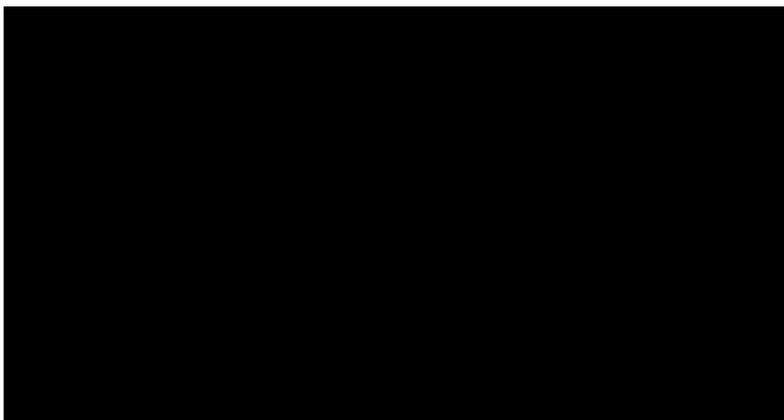


Figura 2. Imagen satelital de planta de Celulosa.

- Área de preparación madera

En esta área se recepciona la madera que ingresa a planta. En esta área se elimina la arena, piedras y metales asociados a los troncos. Posterior a esto, los troncos descortezados y limpios son alimentados al astillador, retirando los troncos que estén fuera de norma. En el astillador los troncos se convierten en astillas, reduciendo su tamaño a la granulometría requerida por el proceso. Estas astillas son enviadas hacia la pila de almacenamiento. Las astillas desde la pila de almacenamiento son enviadas por medio de tornillos hacia los harneros, donde estas se clasifican como: aceptados, sobretamaño, sobreespesor y finos. Las astillas clasificadas como sobreespesor son mejoradas para lograr el tamaño correcto, trasladando posteriormente las astillas aceptadas hacia los digestores de las dos líneas de producción. La corteza procesada es enviada y almacenada en Fase 1, específicamente en el área de planta térmica, donde se encuentra la caldera de poder.

- Área de Fibra

Esta área consiste en 3 etapas: cocción, lavado y blanqueo. La etapa de cocción es la encargada de recibir las astillas provenientes desde el área de preparación madera. En esta etapa se separa la celulosa y hemicelulosa de los demás componentes de la madera en el digestor junto a los reactivos químicos (NaOH y Na₂S), entregando al proceso pulpa de celulosa que posteriormente va a la etapa de lavado y deslignificación. Además, en estas etapas las fibras de celulosa son clasificadas para separar y eliminar los nudos, además de retirar parte del contenido residual de lignina. Como las dos etapas mencionadas anteriormente no alcanzan a remover por completo la lignina de la pulpa, se requieren etapas de blanqueo y extracción alternadas para alcanzar una fibra con bajo contenido de lignina (Ek et al. 2009). El área de blanqueo consiste en una secuencia de etapas de separación química, que elimina estructuras presentes en la pulpa no blanqueada mediante el método ECF (*Elemental Chlorine Free*), la cual es la tecnología de blanqueo dominante en la industria, sustituyendo el cloro elemental (Sixta 2008).

- Área de recuperación química y generación de energía

En esta área se recupera gran porcentaje de compuestos orgánicos y reactivos cargados y agotados para ser reutilizados en el proceso. El licor negro débil a la salida de los digestores es concentrado en los evaporadores desde un 12-20% de sólidos hasta un 65-70% de contenido orgánico e inorgánico. Este licor concentrado es enviado a la caldera recuperadora para su combustión, produciendo vapor de alta presión que permite la generación de energía eléctrica y vapor de baja presión para el proceso, además, el contenido inorgánico del licor forma un fundido que consiste principalmente en carbonato y sulfuro de sodio, el que una vez disuelto se denomina licor verde. Este licor es enviado hacia el área de caustificación, donde el carbonato de sodio es convertido en hidróxido de sodio al reaccionar con cal apagada en solución acuosa, de la cual precipita lodo de cal, que es filtrado, lavado y secado para ser enviado al horno de cal, donde es calcinado para regeneración de cal. El resultado de esto, es la obtención de licor blanco, listo para ser nuevamente utilizado en la cocción de madera.

- Área de máquina y línea final

El área de máquina es la encargada de recibir la pulpa proveniente desde el área de blanqueo, para proceder a clasificarla y limpiarla para después formar una hoja continua. A esta hoja se le retira el agua mediante vacío, prensado y secado con aire caliente. A la salida del secador de aire, la hoja continua, es llevada a la unidad de cortadora donde se le da las dimensiones finales a la hoja de celulosa. Posteriormente se llevan las hojas hacia líneas de embalaje, juntando un set de hojas para ser embaladas y almacenadas en bodega.

- Área de efluentes

La función de esta área es adecuar los efluentes tal que permita satisfacer los requerimientos y parámetros ambientales de la legislación chilena y en particular de las exigencias propias de la planta. Dentro de los objetivos se encuentran: clarificar y neutralizar el efluente, bajar la temperatura y color del efluente, disminuir carga orgánica y compuestos clorados. Con relación a los tratamientos para el efluente, Planta de Celulosa presenta tres sistemas: tratamiento primario, secundario y terciario.

3.3 Etapas de Blanqueo ECF

La secuencia de blanqueo ECF, se refiere al proceso libre de cloro elemental, este es uno de los métodos más utilizados en el mundo para blanquear la pulpa de celulosa y es el que se utiliza en Planta de Celulosa. Este método utiliza dióxido de cloro solubilizado en agua, además de álcali, peróxido de hidrogeno y oxígeno como refuerzo en las distintas etapas para la extracción de la lignina. Las ventajas de este método es la reducción significativa de sustancias orgánicas cloradas en la descarga hacia efluentes (Suhr et al. 2015).

Planta de Celulosa presenta ■ líneas de producción, ■, la principal diferencia entre ambas líneas está relacionada con la secuencia de blanqueo, para ■, ■, provisto de lavadores entre cada etapa. Por otro lado, ■ también consta de 4 etapas con la diferencia de utilizar como primera etapa dióxido en caliente (Dual D) y una etapa E_P (Figura 3).

Una de las características de esta planta de celulosa, es presentar un alto consumo de reactivos químicos para blanquear la pulpa, entre estos químicos, el dióxido de cloro resalta debido a sus 3 etapas de blanqueo (D_0 , D_1 y D_2) siendo la etapa D_0 la de mayor demanda.

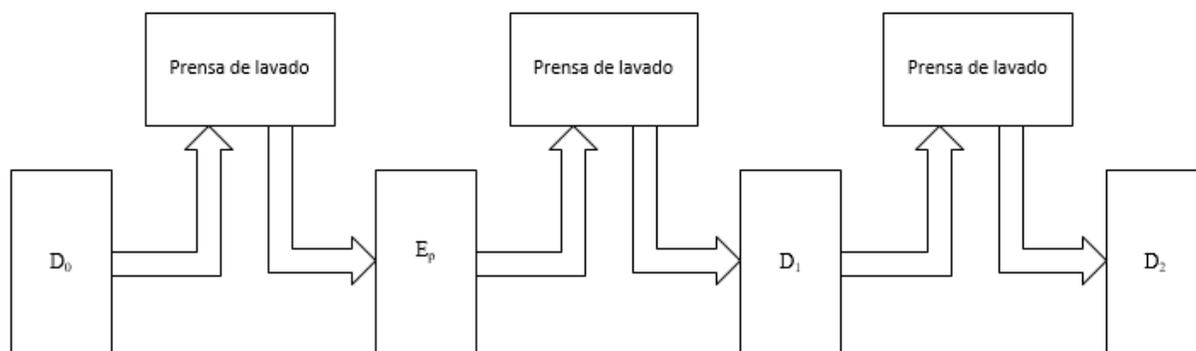


Figura 3. Etapas de blanqueo en Planta de Celulosa.

El costo de producir dióxido de cloro, es el mayor contribuyente al costo de blanqueo de pulpa, por lo tanto, se debe considerar en sus métodos y/o procesos reducir las pérdidas a la hora de generar este agente blanqueador de pulpa (Allison 2004). La secuencia de blanqueo de la pulpa de celulosa consta de diversas etapas, las cuales se describen a continuación en orden al proceso:

- Etapa de pre blanqueo

En esta etapa la pulpa proveniente del área anterior (digestor y lavado) es lavada, para retirar la soda residual que contenga la pulpa antes de ingresar a la primera etapa de blanqueo (D_0), permitiendo así disminuir el consumo de reactivos químicos en etapas posteriores (Arriagada 2012).

- Etapa de blanqueo D_0

En esta etapa, la primera de dióxido de cloro, la lignina contenida en la pulpa reacciona con el dióxido de cloro, con el fin de disminuir su contenido e ir incrementando la blancura de la pulpa. Esta es la etapa de blanqueo, donde ocurre la mayor demanda de dióxido de cloro comparado con otras etapas en la secuencia de blanqueo.

- Etapa de extracción E_{OP}

En esta etapa de extracción con oxígeno y en presencia de peróxido de hidrógeno [REDACTED], reaccionan con la lignina que aún permanece en la pulpa, en el caso [REDACTED], la reacción sólo ocurre con peróxido de hidrógeno. Además, se solubilizan con soda caustica los compuestos generados en la primera y segunda etapa del blanqueo, disminuyendo así el contenido de lignina.

- Etapa de blanqueo D₁

En esta etapa la lignina de la pulpa que aún permanece reacciona nuevamente con dióxido de cloro de tal modo de disminuir su contenido con el objetivo de seguir aumentando la blancura de la pulpa.

Etapa de blanqueo D₂

Esta es la etapa final de blanqueo, la lignina que aún permanece en la pulpa (contenido lignina menor al 5%) reacciona con dióxido de cloro para alcanzar una blancura mayor a 89 %ISO al final del blanqueo.

Como se observa en lo descrito anteriormente, el agente químico para blanquear la pulpa más utilizado es el dióxido de cloro, con el fin de reducir el número de kappa en la pulpa (valor de lignina residual en pulpa) y aumentar la blancura. Es por este motivo que en este estudio se estudiará y analizará el proceso de generación de este agente, teniendo en cuenta las producciones y materias primas que se presentan.

3.4 Planta de Generación de dióxido de cloro

El dióxido de cloro utilizado en las etapas de blanqueo no se transporta normalmente, debido a su riesgo explosivo e inestabilidad de manejo, es por esto que se genera *in situ* en planta teniendo en cuenta un lugar físico estratégico para distribuir este químico blanqueador hacia las distintas etapas de blanqueo de las líneas de producción (Instituto nacional de investigación y seguridad 2000).

La planta de generación de dióxido de cloro de Planta de Celulosa, trabaja con el departamento de ingeniería Cellchem de Eka Chemicals AB, Bleaching Chemicals Europe.

Cellchem se ha especializado en el diseño y entrega de equipos y plantas químicas completas para la industria de la celulosa. El proyecto inicial de Planta de Celulosa consta con una planta basada en el proceso SVP-SCW® (Tabla 3) para una capacidad de producción de █ ton/día. Además, Cellchem incluyó en la entrega de la planta una estación para descarga y disolución de clorato de sodio y una para metanol, además de una unidad enfriadora. Cellchem igual incluyó la opción de trabajar con tecnología SVP-LITE® (Nouryon 2019).

Tabla 3. Tecnologías y capacidades de plantas de celulosa de Arauco en TPD (toneladas por día).

| Planta | Tecnología | Diseño TPD |
|-------------|--------------|------------|
| Arauco 1 | Eka SVP-LITE | █ |
| Arauco 2 | Eka SVP-LITE | █ |
| Valdivia | Eka SVP-SCW | █ |
| Nueva Aldea | Eka SVP-SCW | █ |

La diferencia de tecnologías entre SVP-SCW® y SVP-LITE® es la eficiencia de lavado de la torta de sal y la recuperación de ácido sulfúrico al proceso. El modo SVP-LITE® cuenta solo con el filtro de sulfato, por ende no incluye el tanque de metátesis en el cual ocurre la reacción de separación del sulfato de sodio con el ácido sulfúrico (Figura 4). De acuerdo a la Figura 4, se puede ver que hay una disminución en la cantidad de reactivo utilizado de ácido sulfúrico (Eka Chemicals 2005), esto debido a la recuperación obtenida en el tanque de metátesis que se detalla en el apartado 3.4.4.

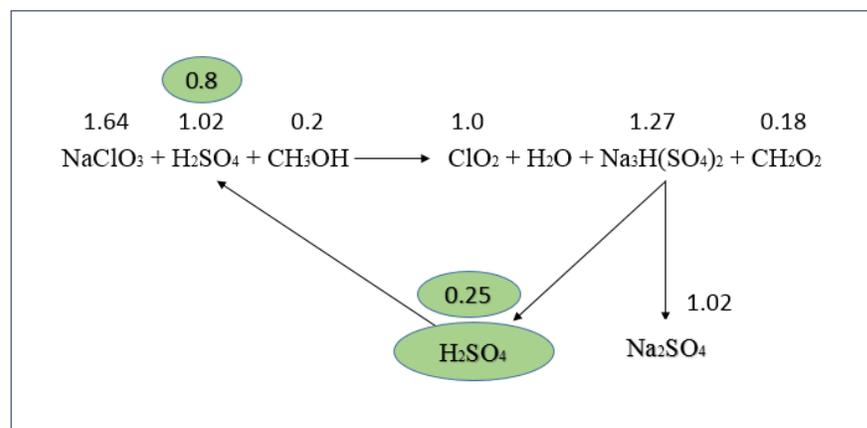


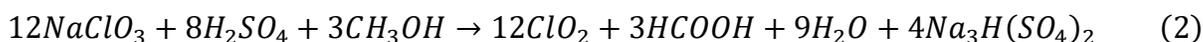
Figura 4. Comparación entre tecnologías SVP-SCW® (en círculo) y SVP-LITE® en el proceso de producción de 1 tonelada de dióxido de cloro.

- Química del proceso SVP-SCW®

Para producir el ClO_2 , el clorato de sodio (NaClO_3) reacciona con metanol (CH_3OH) en una solución de ácido sulfúrico (H_2SO_4). La reacción general (1) se demuestra a continuación (Marambio 2017):



La reacción entre el clorato de sodio, ácido sulfúrico y metanol en el que las sales de sesquisulfato de sodio son cristalizadas en el generador, se muestra a continuación (2):



Con relación a los productos secundarios de proceso, se pueden encontrar: ácido fórmico (HCOOH), sal ácida de sesquisulfato de sodio ($4\text{Na}_3\text{H}(\text{SO}_4)_2$) y agua. Para el lavado de sales en el sistema de manejo de sales se presenta la siguiente reacción (3):



El proceso SVP-SCW® es controlado en planta para mantener un balance óptimo entre la capacidad de producción de ClO_2 , confiabilidad del proceso y costos operacionales. Para realizar esto, se debe tener en cuenta las concentraciones químicas en el generador en una zona ácida donde la sal de sesquisulfato es formada. Esta sal formada posteriormente es disuelta en condiciones controladas de densidad y temperatura para separar la sal neutra de sulfato de sodio y el ácido sulfúrico. Del filtrado de esta separación se obtiene, como se demuestra en ecuación (3), ácido sulfúrico que es recirculado al sistema, mientras que la sal de sulfato de sodio es enviada a evaporadores para el ciclo de recuperación de la celulosa.

Con relación a los consumos específicos por cada químico utilizado en la generación del dióxido de cloro en Planta de Celulosa, se cuenta con valores de diseño especificados en la Tabla 4.

Tabla 4. Consumos específicos de materias primas del proceso SVP-SCW® en toneladas (Marambio 2017).

| Químicos | LITE | SCW |
|--|-------------|-------------|
| Clorato de Sodio (T/T ClO ₂) | 1,64 - 1,66 | 1,64 – 1,66 |
| Ácido Sulfúrico (T/T ClO ₂) | 1,01 – 1,05 | 0,77 – 0,87 |
| Metanol (T/T ClO ₂) | 0,16 – 0,20 | 0,16 – 0,20 |

La capacidad de producción de la planta de dióxido de cloro aumentó en el transcurso de los años llegando a 57 ton/día, esto fue posible gracias a la modificación de un equipo crítico en el proceso.

La eficiencia del proceso de generación de dióxido de cloro en Planta de Celulosa se calcula de acuerdo a la relación de clorato de sodio ocupado para generar el dióxido de cloro, comparando el factor estequiométrico con el factor real de producción (4). Según la estequiometría de reacción, 1 mol de clorato de sodio genera 1 mol de dióxido de cloro, por lo tanto el factor estequiométrico, teniendo en cuenta los pesos moleculares, es de 1,58 toneladas de clorato por 1 tonelada de dióxido de cloro. Sabiendo que el factor entregado por Eka es de 1,64 toneladas de clorato por toneladas de dióxido de cloro, se calcula una eficiencia de diseño de planta para 45 ton/día de producción de 96% (Eka Chemicals 2005).

$$\text{Eficiencia (\%)} = \frac{\text{Consumo de NaClO}_3 \text{ teórico por ton de ClO}_2}{\text{Consumo de NaClO}_3 \text{ real por ton de ClO}_2} \times 100 \quad (4)$$

Dentro de los sistemas que conforman el área química SVP-SCW® se encuentran:

- Materias primas para generación de ClO₂

Las cuatro soluciones necesarias para alimentar el proceso SVP-SCW® son clorato de sodio, ácido sulfúrico, ácido reciclado y en menor cantidad metanol. En este ítem nos enfocaremos en el clorato de sodio, cuyas características son presentadas en la Tabla 5. Este es el reactivo más importante a la hora de producir dióxido de cloro y además es el que se utiliza en mayor cantidad.

El clorato es un oxidante eficaz, si se manipula debidamente sus riesgos son bajos. Pero, al igual que la mayoría de los productos químicos, puede causar daños a las personas, el entorno y

los equipos. Esto puede evitarse si se obtienen los conocimientos necesarios para su manipulación y uso en general.

Tabla 5. Datos y características físicas del clorato de sodio (Eka Chemicals 2005).

| Característica | Descripción |
|--------------------------------|---|
| Apariencia | Cristales blancos, inodoro, amargo y salado |
| Punto de Fusión | 248 - 250°C |
| Descomposición con temperatura | T° mayores a 250°C |
| Densidad Aparente | 1500 kg/m ³ |
| Solubilidad | Soluble en agua |
| pH | Neutro, asume el pH del disolvente |

El clorato en forma de cristales, ingresa a planta a través de vía férrea en contenedores de 26 y 48 toneladas aproximadamente, existe otra opción vía camión cisterna, pero sólo se usa en casos de emergencia. En la descarga de estos carros, los cristales son disueltos utilizando agua caliente y agitación, una vez que se alcanza la concentración requerida para el proceso, la solución es bombeada a los tanques de almacenamiento (Figura 5). Cabe destacar que el ácido reciclado que se menciona como solución necesaria al proceso, es proveniente del sistema de lavado de sales.

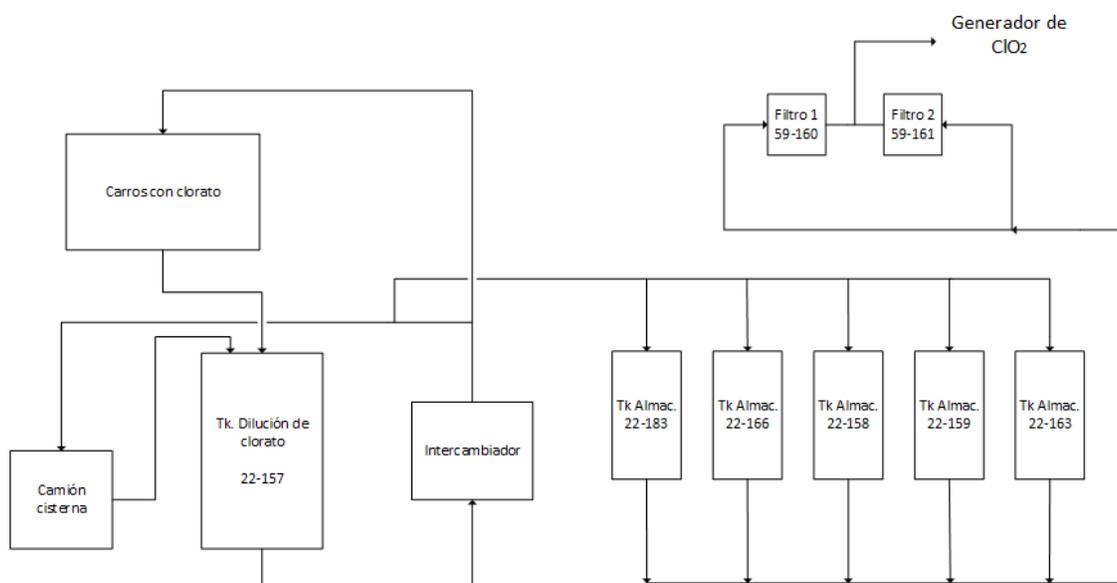


Figura 5. Diagrama de bloques de área de descarga de clorato de sodio.

- Generación de ClO_2

En este sistema predominan los siguientes equipos: generador de ClO_2 , bomba de circulación y hervidor (reboiler). La función del generador es proveer el volumen necesario para que las materias primas de este proceso reaccionen y generen el dióxido de cloro. Otro punto importante es la función del reboiler, esta es evaporar el agua presente en las soluciones de los químicos reactantes que va recirculando con el objetivo de mantener un nivel específico en el generador. En el proceso de igual manera se tiene énfasis en la cristalización de las sales de sesquisulfato de sodio que se produce en la reacción química (Moraes 2016).

- Manejo de Sales

El sistema de manejo de sales incluye un filtro de sales de sesquisulfato y un filtro de sulfato, cada filtro tiene un posterior separador de filtrado. Además de los filtros, el sistema posee un tanque de metátesis, un tanque disolvedor y un tanque de filtrado.

Con relación a los dos filtros el funcionamiento es el mismo, el tambor del filtro rota dentro de la tina llena de licor. Dentro de los tambores existe vacío generado por los eyectores del sistema. El vacío arrastra los cristales hacia la tela del filtro, la rotación del filtro saca los cristales. Esta torta es lavada con agua y secada en la superficie del tambor. Las diferencias entre los dos filtros de Planta de Celulosa es el tamaño, siendo el filtro de sesquisulfato mayor. El licor (combinación de aire y líquido) es arrastrado al interior del tambor, para luego ser transportado hacia el separador de filtro por vacío, en este separador el gas es retirado y el líquido que se separa fluye de vuelta al múltiple del generador.

El tanque de metátesis dispuesto después del primer filtro (sesquisulfato) recibe las sales de este, y son disueltas en la solución acida diluida. En este tanque ocurre la separación del ácido sulfúrico y las sales de sulfato de sodio encontradas en las sales de sesquisulfato a través de adición de agua caliente conforme a la reacción.

El tanque disolvedor se encuentra posterior al segundo filtro (sulfato de sodio), en este las sales neutras son disueltas en agua caliente, este flujo de agua se controla de acuerdo a la densidad de la solución, asegurando que exista suficiente agua para disolver estas sales. El sulfato generado se envía a evaporadores, si es necesario se añade NaOH para ajustar pH.

En este sistema se incluye un tanque de filtrado correspondiente a la tecnología [REDACTED], este estanque tiene la función de enviar filtrado ácido hacia el área de blanqueo, además la opción de alimentar el tanque de metátesis y el filtro de sales si es que el operador del área lo determina.

- Absorción del ClO_2 y lavado de gases

El sistema de absorción y lavado de gases incluye un condensador de gases, una torre de absorción y un scrubber (lavador de gases).

Los gases que se forman en el generador son arrastrados al condensador con el objetivo de condensar el vapor de agua, posterior a esto el gas es arrastrado hacia la torre de absorción. El dióxido de cloro (gases del generador) entra por la parte inferior de la torre y es arrastrado hacia la parte superior en contra corriente con agua helada, en este punto los gases son absorbidos generando la solución de dióxido de cloro.

Los gases saliendo del condensador de los eyectores son mezclados con corrientes de ventilación de otros sistemas: tanque de vaciado, filtros de sales, tanques de almacenamiento de dióxido y otras corrientes menores de ventilación. El ventilador arrastra esas corrientes a través del lavador de gases, en el lavador, esas corrientes son lavadas con agua helada para absorber cualquier posible resto de dióxido presente, la solución que sale del lavador es bombeada para la torre de absorción. Los gases que pasan finalmente por el lavador (scrubber) son descargados a la atmósfera (Eka Chemicals 2005).

- Almacenamiento de ClO_2

Una vez generado el dióxido de cloro, este se almacena en 6 tanques de almacenamiento de dióxido de cloro de capacidad de 270 m^3 bajo condiciones controladas que dan sustento de este químico a las etapas D_0 , D_1 y D_2 de blanqueo de ambas líneas de producción.

El diagrama de bloques de producción de dióxido de cloro en Planta de Celulosa, teniendo en cuenta el sistema SVP-SCW® se presenta en la Figura 6, donde los equipos principales son reactor, condensador y torres de absorción.

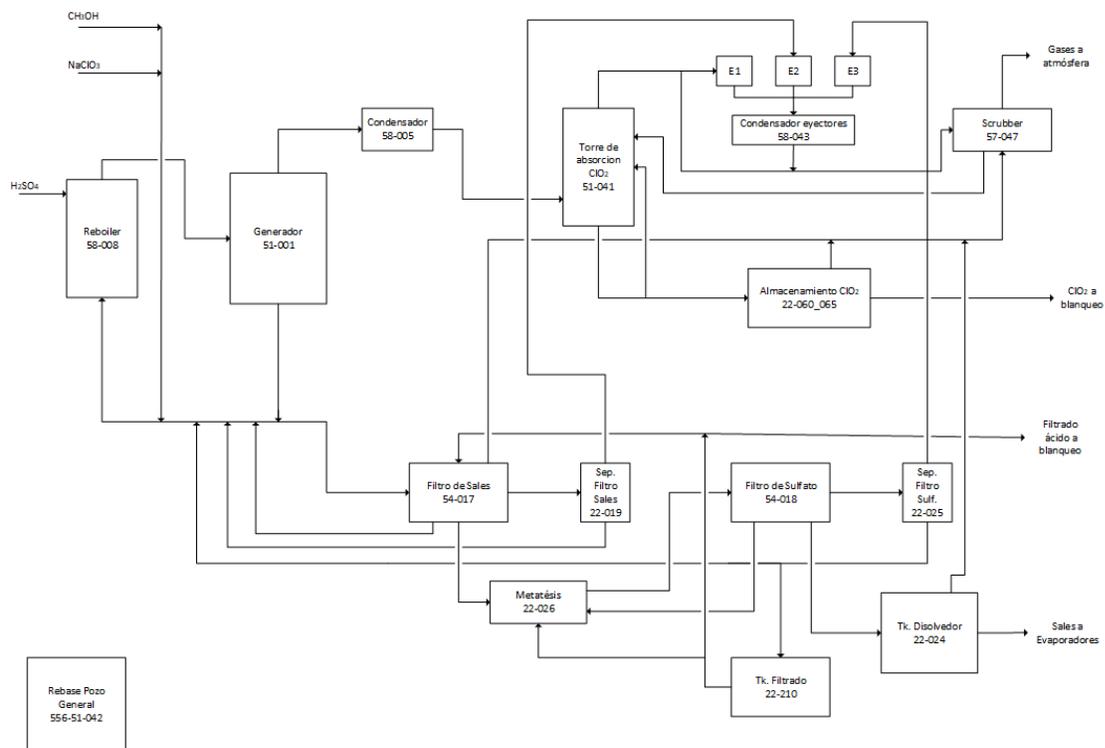


Figura 6. Diagrama de bloques planta generación de dióxido de cloro en Planta de Celulosa.

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

- Optimizar el consumo de clorato de sodio en la planta generadora de dióxido de cloro en Planta de Celulosa.

4.2 Objetivos específicos

- Evaluar rendimiento de la planta generadora de dióxido de cloro en relación al consumo de clorato de sodio para distintos rangos de producción.
- Determinar mediante balances de materia el clorato de sodio en la producción de dióxido de cloro.
- Recomendar estrategia de operación en la planta generadora de dióxido de cloro para la optimización del uso de clorato de sodio.

5 METODOLOGÍA

Este trabajo de Habilitación Profesional fue desarrollado en Planta de Celulosa de empresas Arauco, específicamente en la Planta generadora de dióxido de cloro.

Para iniciar este trabajo se realizó un análisis de eficiencia de generación de la planta por mes, teniendo en cuenta el consumo de clorato de sodio y la producción de dióxido de cloro, desde febrero hasta junio de este año (2019), con el objetivo de cuantificar las pérdidas de clorato y la eficiencia del sistema. Posterior al análisis de eficiencias, se realizaron balances de masa global en el sistema, considerando el esquema presentado en la Figura 7.

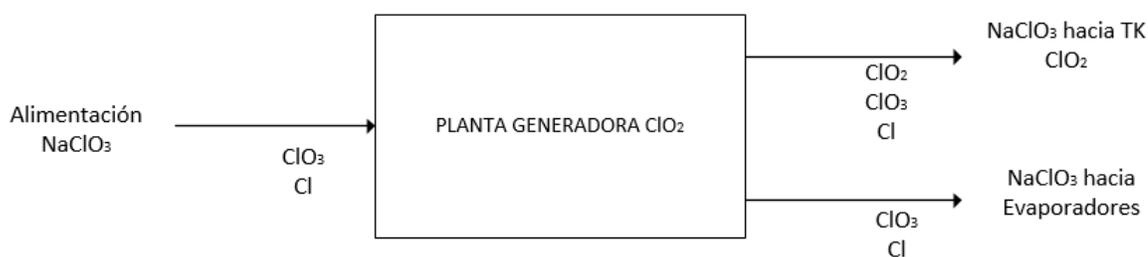


Figura 7. Diagrama de bloques utilizado para realizar el balance de masa.

El balance global se realizó en base al cloro, para así tener una idea concreta del clorato de sodio que entra y sale al sistema, teniendo en cuenta sus distintos estados en el proceso de generación. Los flujos de clorato, dióxido de cloro y cloruro fueron expresados como clorato de sodio. El balance global, tiene como objetivo encontrar el flujo másico que llega hacia los estanques (TK) de dióxido de cloro y la acumulación de clorato de sodio que existe en el sistema para los distintos rangos de producción de dióxido de cloro.

Para el balance de masa de mediciones de laboratorio, se analizaron muestras en distintas líneas del proceso en puntos de muestreo seleccionados (Figura 8) de acuerdo al previo estudio de los equipos de planta para tener en cuenta las salidas del proceso, para con esto analizar la eficiencia de conversión de clorato de sodio en dióxido de cloro con ayuda de los reactivos. Para la obtención de concentraciones de clorato, cloruro y dióxido de cloro, se realizaron muestras, que fueron obtenidas y supervisadas por los operadores del área, para luego ser analizadas en el laboratorio central con la ayuda de laboratoristas de planta.

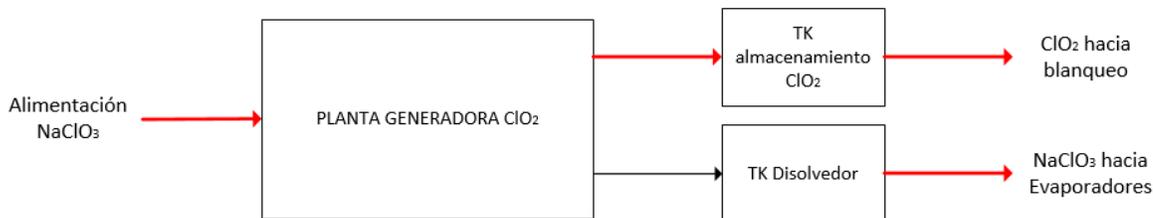


Figura 8. Puntos seleccionados para balance de masa de cloro en planta generadora de dióxido de cloro (indicados con flecha roja).

Posterior al análisis de pérdida y comprobación, se presentará un análisis económico de acuerdo a las producciones realizadas en el año 2018 y 2019 teniendo en cuenta el costo por pérdida de clorato de sodio.

5.1 Recursos materiales y equipamiento

- Planos P&ID de Planta generadora de dióxido de cloro.
- Manuales de operación del área (SVP-SCW®, 2005) de Planta generadora de dióxido de cloro para identificar el diseño de los equipos presentes y realizar la elaboración inicial del diagrama de flujo del proceso.
- Visitas a sala de control y terreno, para resolver las dudas e inquietudes presentadas en el transcurso del trabajo.
- Reuniones con ingenieros DCS y acceso a pantallas de sala de control representadas por la instrumentación presente en terreno.
- *Software* para balances de masa y recopilación de datos: IP21 (Aspen InfoPlus 21), LAB21 y Wedge 8.2 (Process Analysis System), plataformas que actúan como base de datos de la planta, recopilando datos en tiempo real y almacenando en línea, lo que permite un posterior análisis mayormente de tendencias de las variables de proceso.
- Excel 2013 de Microsoft en conjunto con los datos exportados de Wedge y Aspen, para calcular los flujos de clorato de sodio, dióxido de cloro y cloruro (simulación de balance de masa).
- Reactivos y equipamiento de laboratorio suministrados por el laboratorio central de la planta a cargo de la Superintendencia de Proceso para determinación de clorato de sodio en solución de dióxido de cloro.

5.2 Procedimiento

En la Figura 9 se presenta la secuencia de actividades clave que se realizaron para el cumplimiento de los objetivos presentes en el trabajo.

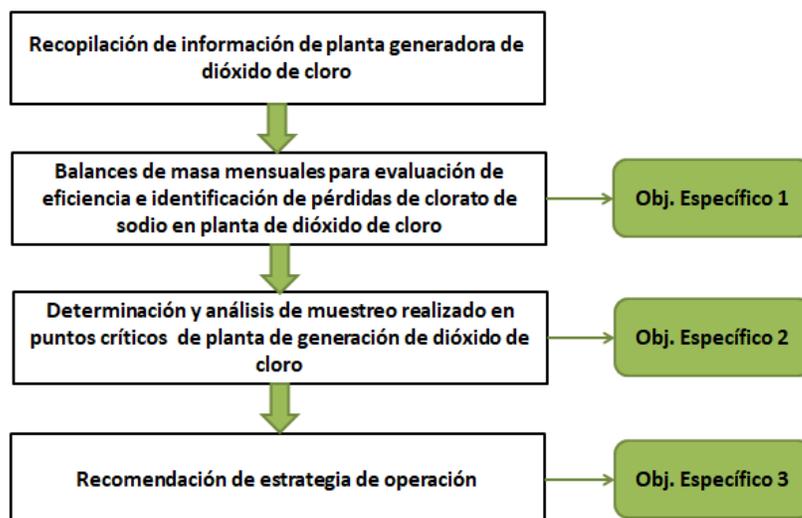


Figura 9. Secuencia de actividades clave realizadas para el desarrollo del trabajo.

a) Recopilación de Información de Planta generadora de dióxido de cloro

La recopilación obtenida teórica y práctica-terreno permitió el desarrollo de diagramas de bloques clave para entender el proceso y ubicar los puntos a considerar para realizar el balance de masa de planta generadora de dióxido de cloro. De los planos se obtuvieron los parámetros de los equipos y diseño en general de la planta, detallando las líneas entre los equipos. El manual de operación de planta fue una gran ayuda debido a que en él se encuentran especificadas las descripciones del proceso, parámetros de operación y procedimientos a considerar para realizar el balance de masa.

Para la recopilación de variables como lo son densidades y medidores de flujo se utilizaron los recursos de pantallas dispuestas en la sala de control del edificio central de planta, análisis de laboratorio y además se utilizó la plataforma IP21 y Wedge 8.0, desde estas se obtuvo la información necesaria para plantear y crear el balance de masa a partir de los TAGs de operación y laboratorio, involucrados en los puntos de medición.

- b) Balances de masa mensuales para evaluación de eficiencia e identificación de pérdidas de clorato de sodio en planta de dióxido de cloro.

Para objetivo específico N°1:

La evaluación de eficiencia para los meses de febrero, marzo, abril, mayo y junio (2019), se realizó mediante las herramientas Excel, Aspen y Wedge 8.0. Los días de análisis (Tabla 6) se filtraron dejando fuera los días de detención de planta con el objetivo de tener resultados más representativos del funcionamiento normal de la planta, estas detenciones corresponden principalmente a niveles altos en los tanques de dióxido de cloro y a trabajos específicos en el área. La eficiencia se calculó comparando la estequiometría de la reacción con las producciones reales. Los datos de entrada y salida hacia evaporadores del sistema se encontraban en DCS y la base de datos del laboratorio central de la planta. El cálculo de las pérdidas de clorato y acumulación del sistema por la línea de dióxido de cloro se realizó mediante el balance de masa de los 3 puntos mencionados.

Tabla 6. Días de muestreo por cada mes de estudio.

| Mes | Días |
|---------|------|
| Febrero | 22 |
| Marzo | 22 |
| Abril | 24 |
| Mayo | 25 |
| Junio | 12 |

- c) Determinación y análisis de muestreo realizado en puntos críticos de planta de generación dióxido de cloro.

Para objetivo específico N°2:

Con la información recopilada y teniendo los puntos específicos para el muestreo (Tabla 7) de las concentraciones de clorato de sodio en el proceso, se analizaron 4 muestras, correspondientes a cada punto específico seleccionado en el diagrama de bloques anterior (Figura 8), este muestreo se realizó con extremas medidas de seguridad, utilizando EPPs en supervisión del operador de terreno.

Tabla 7. Número de muestras y puntos de muestreos a considerar para realizar el balance de masa.

| Número de muestra | Puntos de muestreo |
|-------------------|---|
| 1 | NaClO ₃ alimentación generador |
| 2 | Descarga torre de Absorción De ClO ₂ |
| 3 | Descarga TK almacenamiento ClO ₂ |
| 4 | Descarga TK disolvedor hacia evaporadores |

Para la determinación de las concentraciones de clorato de sodio en la solución de dióxido de cloro, se utilizó el instructivo creado para realizar tal medición, esta determinación se realizó bajo supervisión de laboratoristas, siguiendo el protocolo de experimentación de la empresa.

En base a los resultados de concentraciones obtenidos en laboratorio y los flujos identificados en pantalla y *software* (Tabla 8), se procedió a identificar las pérdidas, acumulación y eficiencias de la planta de generación para distintos rangos de producción, con la herramienta Excel se simularon las entradas de reactivos al sistema y las salidas, realizando un balance de masa de clorato, cloruro y dióxido de cloro.

Tabla 8. Levantamiento de información correspondiente a instrumentación necesaria para el balance de masa (TAGs para plataformas IP21, LAB21 y Wedge 8.0).

| Puntos de muestreo | Indicador de flujo | ClO ₃ | ClO ₂ | Cl |
|--------------------|--------------------|------------------|------------------|------------|
| 1 | ██████████ | ██████████ | █ | ██████████ |
| 2 | ██████████ | █ | ██████████ | ██████████ |
| 3 | ██████████ | █ | ██████████ | ██████████ |
| 4 | ██████████ | ██████████ | █ | ██████████ |

Una vez obtenida la relación de pérdida/costo entre cada rango de producción de dióxido de cloro, se realizó un análisis económico con la ayuda del software Wedge 8.0 en el cual se calculó cantidad de días que se trabajaron a ciertas producciones para los años 2018 y 2019. El precio de compra de clorato de sodio por parte de la empresa se calculó de acuerdo a un promedio del valor mensual de compra de los años 2018 y 2019, obteniendo un valor de ██████ USD/tonelada.

d) Estrategia de operación

Para objetivo específico N°3:

La estrategia de operación está relacionada con la realización de un análisis diario de concentración de clorato de sodio, en la salida de la torre de absorción y salida de los tanques de almacenamiento de dióxido de cloro, con el fin de cuantificar la cantidad de clorato de sodio presente en esas fases del proceso. Actualmente no existe un método de determinación de laboratorio en planta, por lo tanto se formuló un método de medición (utilizado para la medición de clorato en solución de dióxido de cloro) y se propondrá para quedar como instructivo de determinación en el laboratorio central.

Para esta determinación, se tiene en cuenta que la muestra tiene alto contenido de dióxido de cloro, lo que deja una medición no acertada a lo que realmente está sucediendo en el sistema debido a la alta concentración, por esa razón, el procedimiento consiste inicialmente en purgar este dióxido de cloro de la muestra aireando con nitrógeno hasta que visualmente esta muestra quede completamente incolora, una vez preparada esta muestra, empieza el método de determinación de clorato, utilizando bromuro de sodio al 10%, ácido clorhídrico concentrado, yoduro de potasio al 10%, tiosulfato de sodio 0.1 M para la titulación y almidón como indicador.

Con este método se puede determinar la concentración de clorato y clorato de sodio, teniendo en cuenta los pesos moleculares, según fórmula. El instructivo detallado entregado para la determinación se encuentra en Anexo 16.

6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Balance de masa con base de datos obtenidos en levantamiento de información

A continuación se presentan los resultados obtenidos a través de *software* Wedge 8.0 y Aspen para la realización del balance de masa global en la obtención de eficiencias y cuantificación de clorato de sodio no reaccionado para los distintos rangos de producción (Tabla 9). El trabajo realizado responde al objetivo 4.2.1: *Evaluar rendimiento de la planta generadora de dióxido de cloro en relación al consumo de clorato de sodio para distintos rangos de producción.*

Tabla 9. Tabla resumen de datos generales obtenidos para determinar eficiencia de Planta generadora de ClO₂.

| Producción ClO ₂ (ton/día) | Gasto NaClO ₃ (ton/día) | Eficiencia (%) | Total de NaClO ₃ no reaccionado (ton/día) | Diferencia diseño NaClO ₃ no reaccionado (ton/día) |
|---------------------------------------|------------------------------------|----------------|--|---|
| 46 | 76,6 | 95,3 | 3,6 | 0,6 |
| 48 | 79,8 | 94,5 | 4,4 | 1,23 |
| 50 | 84,6 | 93,4 | 5,5 | 2,12 |
| 52 | 87,8 | 92,8 | 6,18 | 2,66 |

Como se puede observar en la Tabla 9, a mayor gasto de clorato de sodio, existe una mayor pérdida de eficiencia de la planta generadora de ClO₂. En esta pérdida de eficiencia se puede notar un aumento en el consumo de clorato de sodio no reaccionado para la producción de dióxido de cloro.

Al realizar el gráfico de eficiencia (Figura 10), con los datos obtenidos se destaca que para 45 ton/día, [REDACTED], se obtuvo una eficiencia del 95,5% disminuyendo [REDACTED], de acuerdo a lo establecido por Eka ([REDACTED] eficiencia para [REDACTED] ton/día) al inicio del proyecto para Planta de Celulosa.

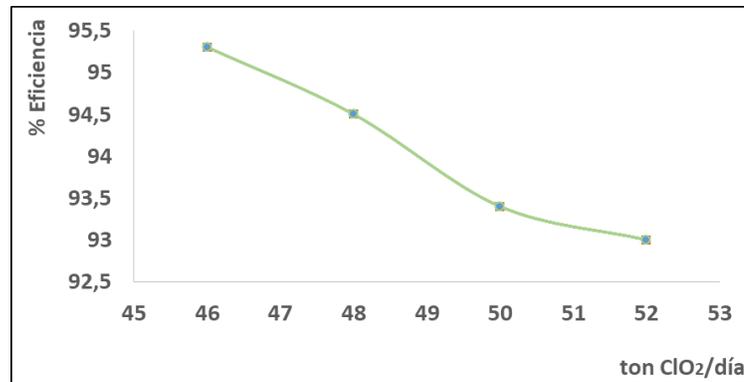


Figura 10. Curva de eficiencia planta generadora de dióxido de cloro, considerando cuatro puntos de producción.

Las pérdidas de clorato de sodio aumentan de manera directamente proporcional con el aumento de flujo de alimentación para satisfacer los distintos rangos de producción. Con respecto a la diferencia entre las pérdidas esperadas de acuerdo al diseño inicial de planta y lo real, se presenta una pérdida significativa si la operación se mantiene a altas producciones.

6.1.1 Análisis de Eficiencias del proceso

Para la obtención de eficiencias de las producciones desde 52 hasta 57 ton/día generadas de dióxido de cloro, se realizó un modelo de regresión lineal (Figura 11) para analizar la función y ecuación de la recta obtenida.

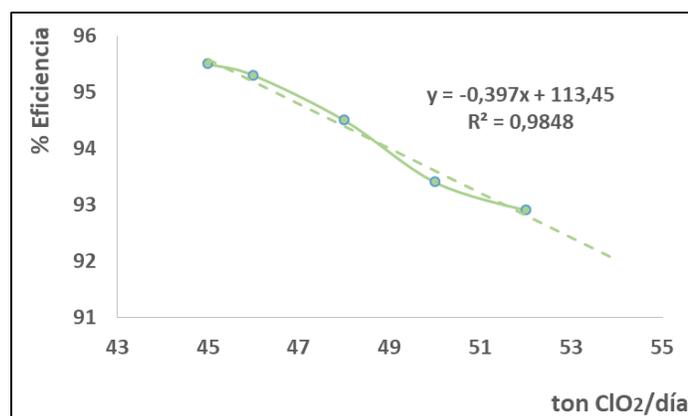


Figura 11. Línea de tendencia con modelo de regresión lineal para curva de eficiencia planta de dióxido de cloro.

El modelo se ajusta a una regresión lineal, obteniendo un $R^2 = 0,98$, con esto se puede ver una tendencia de pérdida de eficiencia para la generación de dióxido de cloro desde un 95,5% correspondiente a 45 ton/día hasta un 90,8% para 57 toneladas de dióxido de cloro producidas al día, viendo que el punto óptimo de operación es a menor producción (Tabla 10).

Tabla 10. Eficiencias en la producción de dióxido de cloro obtenidas con el modelo de regresión lineal.

| Producción (ton/día) | Eficiencia % |
|----------------------|--------------|
| 45 | 95,5 |
| 46 | 95,3 |
| 48 | 94,5 |
| 50 | 93,4 |
| 51 | 93 |
| 52 | 92,8 |
| 53 | 92,4 |
| 55 | 91,6 |
| 57 | 90,8 |

6.1.2 Predicción de pérdida de clorato de sodio mediante balance total real

A continuación se describen de los balances de materia obtenidos para valores representativos de producción de ClO_2 . Cabe destacar que las toneladas de clorato de sodio en la línea de dióxido de cloro, hacen referencia a la suma del clorato presente en la línea de descarga con la acumulación del sistema de generación, esta acumulación es representada con la letra “A”. A continuación se informa los balances de materia para producciones de 46, 48, 50 y 52 ton/día de ClO_2 .

- Balance de masa para producción de 46 ton/día ClO_2

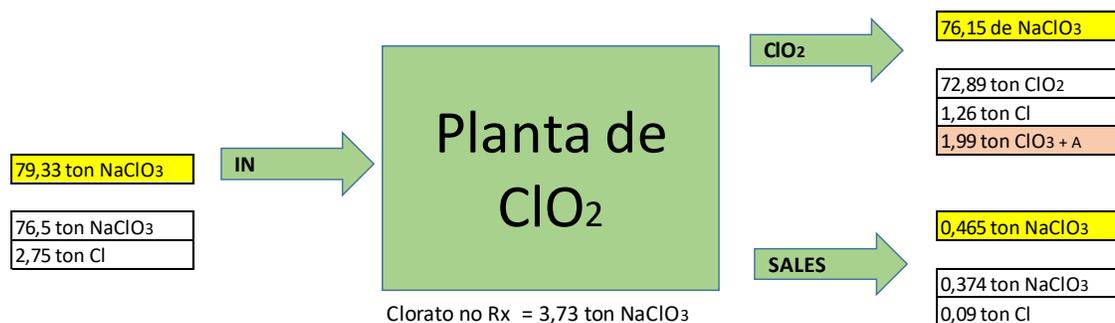


Figura 12. Balance de masa actual planta dióxido de cloro con producción de 46 ton/día.

- Balance de masa para producción de 48 ton/día ClO_2

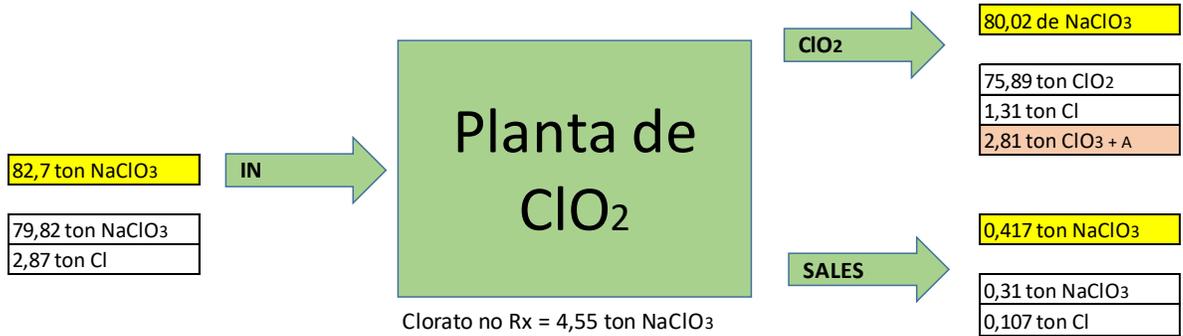


Figura 13. Balance de masa actual planta dióxido de cloro con producción de 48 ton/día.

- Balance de masa para producción de 50 ton/día ClO_2

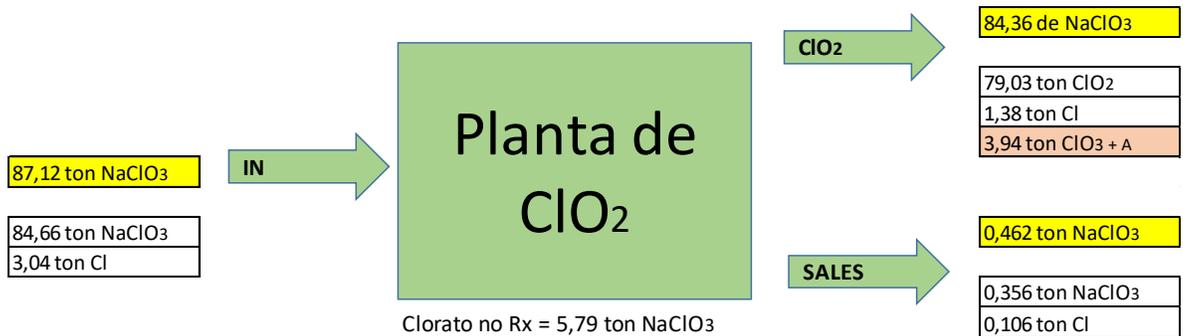


Figura 14. Balance de masa actual planta dióxido de cloro con producción de 50 ton/día.

- Balance de masa para producción de 52 ton/día ClO_2

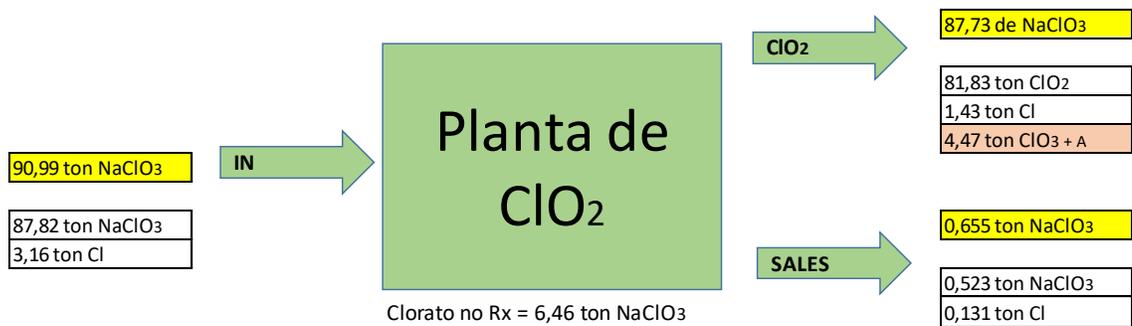


Figura 15. Balance de masa actual planta dióxido de cloro con producción de 52 ton/día.

Como se puede observar en la Tabla 11, a medida que aumenta el flujo de clorato de sodio en la alimentación del generador (para cumplir los requerimientos de producción), va a existir un aumento de cloruro en el sistema de generación. Con respecto al manejo de sales se denota que no existe gran diferencia entre el clorato y cloruro analizado en la línea hacia evaporadores, hasta la producción de 50 ton/día de dióxido de cloro. Para producciones mayores existe un aumento de cloruro y clorato en esa línea. En el caso de la torre de absorción, se puede ver un aumento directamente proporcional de cloruro y clorato en la línea de descarga de la torre y la acumulación del sistema a medida que la producción aumenta.

Tabla 11. Tabla Resumen de Balance de masa con condiciones actuales de planta dióxido de cloro.

| Producción ClO ₂ (ton/día) | Gasto NaClO ₃ (ton/día) | NaClO ₃ no Rx. TK más Acum. (ton/día) | NaClO ₃ hacia Evaporadores (ton/día) | NaClO ₃ no reaccionado (ton/día) |
|---------------------------------------|------------------------------------|--|---|---|
| 46 | 79,3 | 3,26 | 0,47 | 3,73 |
| 48 | 82,7 | 4,12 | 0,42 | 4,55 |
| 50 | 87,1 | 5,32 | 0,46 | 5,79 |
| 52 | 90,9 | 5,44 | 0,66 | 6,10 |

6.1.3 Predicción de pérdida de clorato de sodio mediante balance total según diseño

A continuación se presenta un resumen de los balances de materia obtenidos para cada rango de producción en estudio (Figura 16 - 19) teniendo en cuenta las pérdidas con una eficiencia de diseño de planta de un ████. Cabe destacar que las toneladas de ClO₃ en la línea de dióxido de cloro refiere a la suma del clorato presente en la línea de descarga y en la acumulación del sistema de generación.

- Rango de producción 46 ton/día ClO₂



Figura 16. Balance de masa diseño planta dióxido de cloro con producción de 46 ton/día.

- Rango de producción 48 ton/día ClO₂

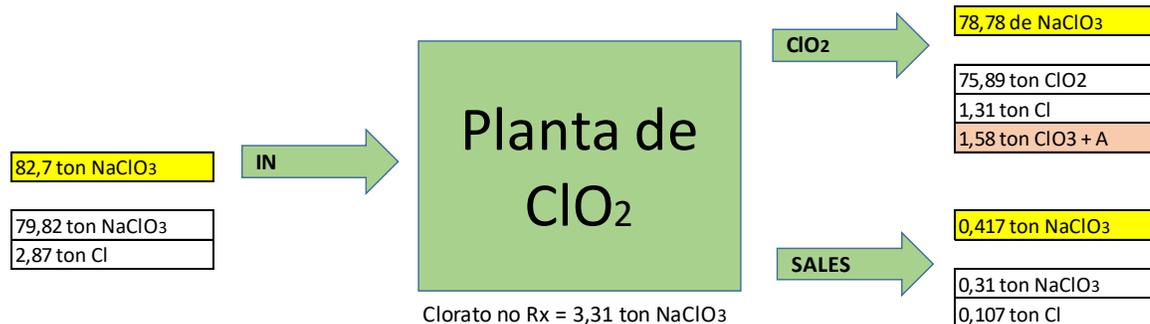


Figura 17. Balance de masa diseño planta dióxido de cloro con producción de 48 ton/día.

- Rango de producción 50 ton/día ClO₂



Figura 18. Balance de masa diseño planta dióxido de cloro con producción de 50 ton/día.

- Rango de producción 52 ton/día ClO₂



Figura 19. Balance de masa diseño planta dióxido de cloro con producción de 52 ton/día.

Tabla 12. Tabla Resumen de Balance de masa con condiciones de diseño de planta dióxido de cloro.

| Producción ClO ₂ ton/día | Gasto NaClO ₃ ton/día | NaClO ₃ no Rx. TK más Acum. ton/día | NaClO ₃ hacia Evaporadores ton/día | NaClO ₃ no reaccionado ton/día |
|--|-------------------------------------|---|--|--|
| 46 | 79,3 | 2,7 | 0,465 | 3,17 |
| 48 | 82,7 | 2,89 | 0,417 | 3,3 |
| 50 | 87,1 | 3,04 | 0,462 | 3,5 |
| 52 | 90,9 | 3,01 | 0,655 | 3,6 |

Al igual que en el análisis actual de producción y eficiencias se identifican pérdidas de clorato de sodio, con mayor relación a la salida de la torre de absorción que al sector de manejo de sales (Tabla 12). Para 46-50 toneladas de dióxido de cloro las pérdidas de clorato de sodio hacia evaporadores se distribuye de forma constante, en cambio las pérdidas de clorato de sodio en los estanques de dióxido de cloro aumentan a medida que incrementa la producción de dióxido de cloro en conjunto con la acumulación del sistema.

6.2 Predicción de pérdida de clorato de sodio mediante balance de masa con respecto a análisis de laboratorio

Los balances de masa a continuación fueron realizados con el objetivo de diferenciar la acumulación en el sistema con la pérdida de clorato de sodio en la salida de la torre de absorción, el trabajo realizado en este apartado corresponde al objetivo 4.2.2: *Realizar balances de materia para cuantificar el consumo de clorato de sodio en la producción de dióxido de cloro.*

- Rango de producción 45 ton/día ClO₂

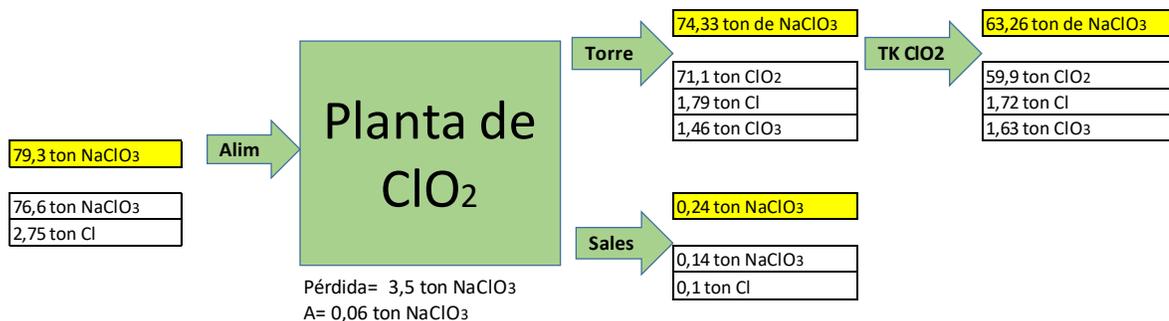


Figura 20. Balance de masa con mediciones de laboratorio para producción de 45 ton/día.

- Rango de producción 46 ton/día ClO_2

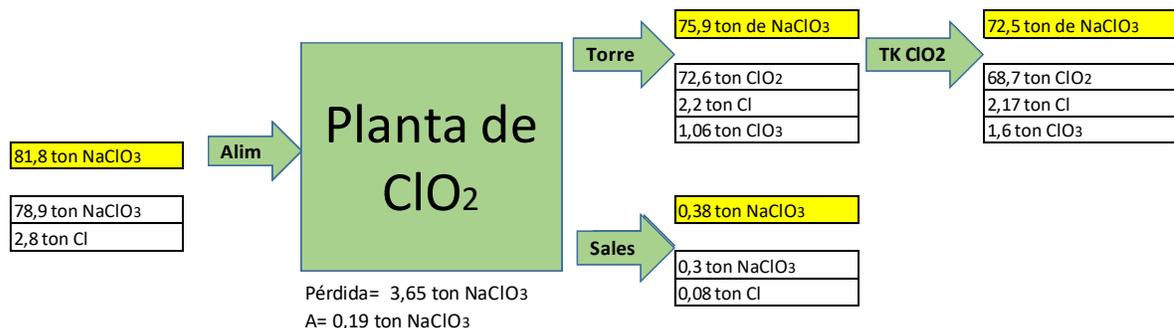


Figura 21. Balance de masa con mediciones de laboratorio para producción de 46 ton/día.

- Rango de producción 48 ton/día ClO_2

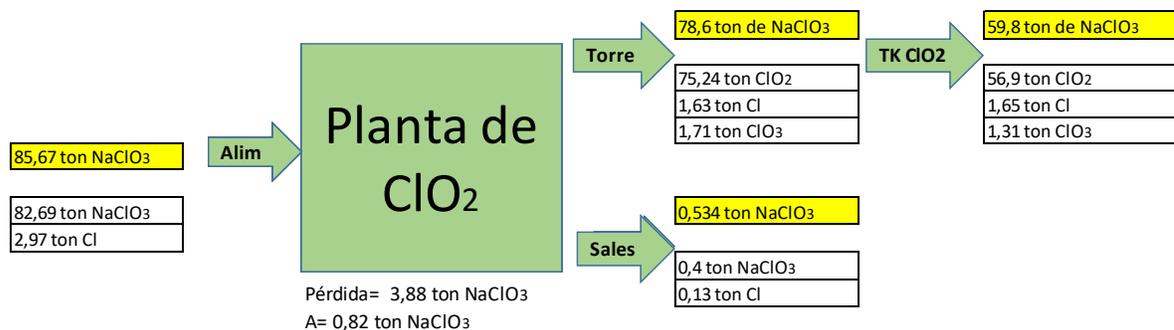


Figura 22. Balance de masa con mediciones de laboratorio para producción de 48 ton/día.

- Rango de producción 50 ton/día ClO_2

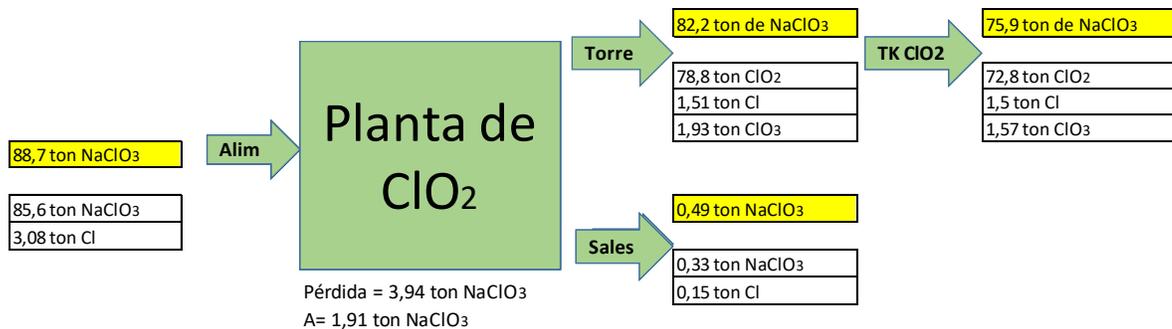


Figura 23. Balance de masa con mediciones de laboratorio para producción de 50 ton/día.

- Rango de producción 51 ton/día ClO_2

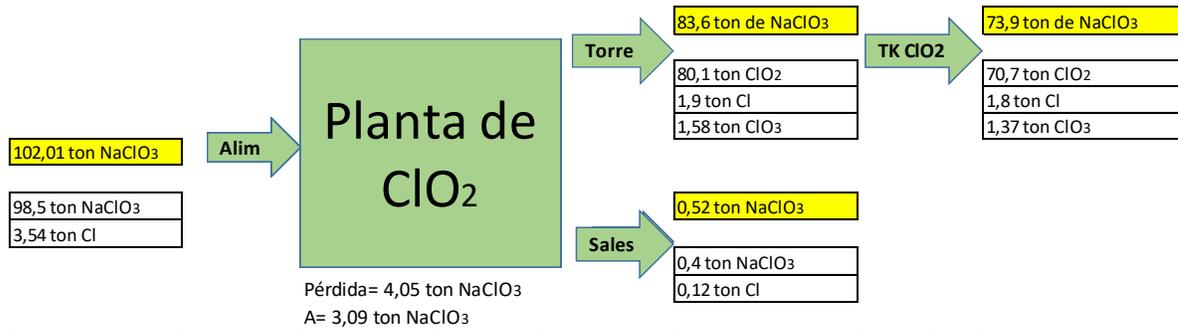


Figura 24. Balance de masa con mediciones de laboratorio para producción de 51 ton/día.

- Rango de producción 52 ton/día ClO_2

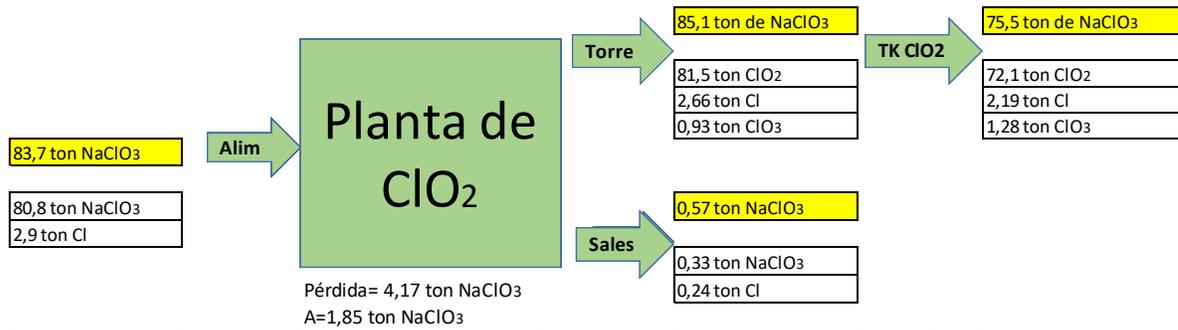


Figura 25. Balance de masa con mediciones de laboratorio para producción de 52 ton/día.

- Rango de producción 53 ton/día ClO_2

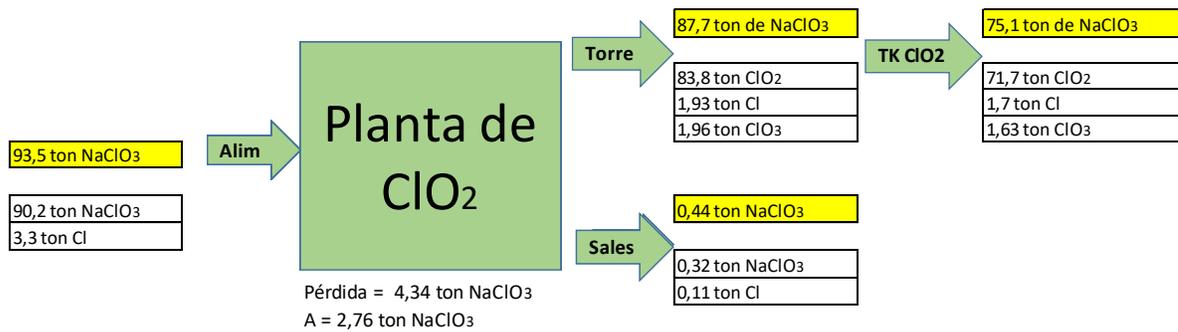


Figura 26. Balance de masa con mediciones de laboratorio para producción de 53 ton/día.

- Rango de producción 55 ton/día ClO₂

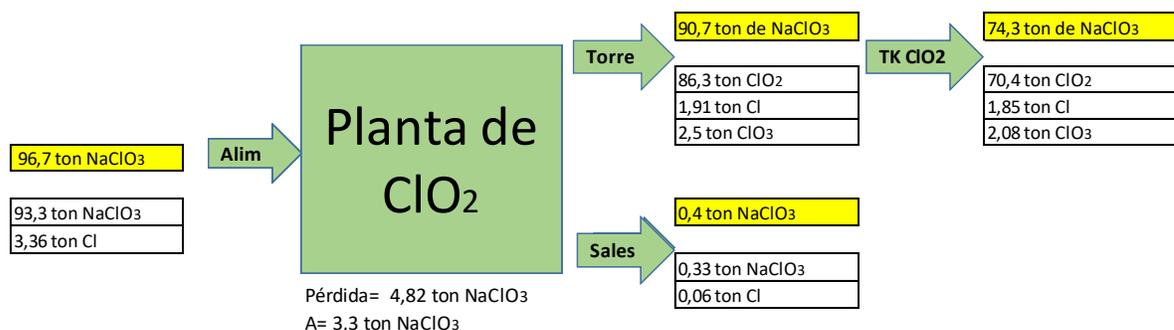


Figura 27. Balance de masa con mediciones de laboratorio para producción de 55 ton/día.

- Rango de producción 57 ton/día ClO₂

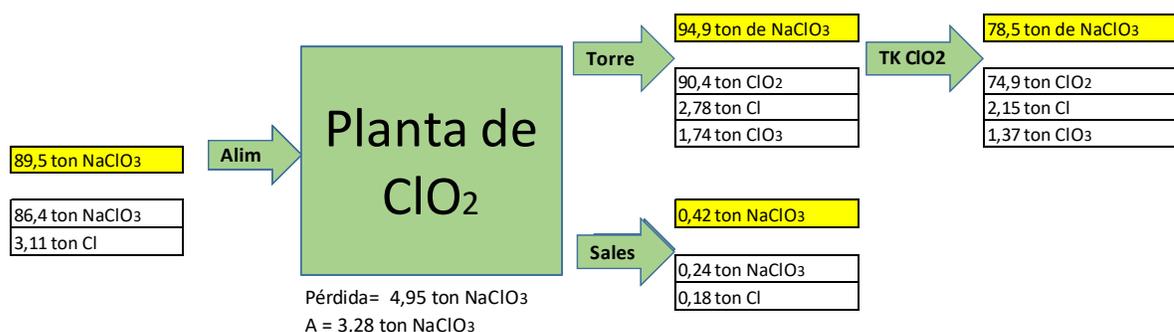


Figura 28. Balance de masa con mediciones de laboratorio para producción de 57 ton/día.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la determinación de clorato de sodio en las soluciones de dióxido de cloro (Figuras 20 a la 28), se observan diferencia en pérdidas del sistema con la acumulación del clorato de sodio en la recirculación del generador. Con estos resultados, se comprueba que la mayor parte de la pérdida total de clorato de sodio en el sistema de generación se encuentra en la línea de dióxido de cloro y no en el sistema de sales. Esta pérdida aumenta considerablemente a medida que la producción de dióxido de cloro aumenta, donde se observa una diferencia cercana a 2 toneladas de pérdida de clorato de sodio diaria comparando una producción de 45 ton/día y una de 57 ton/día de dióxido de cloro, lo que provoca un mayor valor de costo agregado al proceso y además se provocar un impacto en los equipos relacionados a la absorción del dióxido de cloro producido. El aumento de clorato de sodio hacia la línea de dióxido de cloro a mayor producción, se puede explicar debido a un aumento de acumulación en la recirculación del generador, con esta acumulación existe gran

cantidad de sales que deben reaccionar para producir el dióxido de cloro, como aumentan las sales no reaccionadas en el sistema, aumenta el tiempo de residencia de éstas en la línea de recirculación, lo que puede provocar una disminución del tamaño de partícula, lo que finalmente puede facilitar el arrastre de estas sales a la etapa de absorción de dióxido de cloro, específicamente a la torre de absorción.

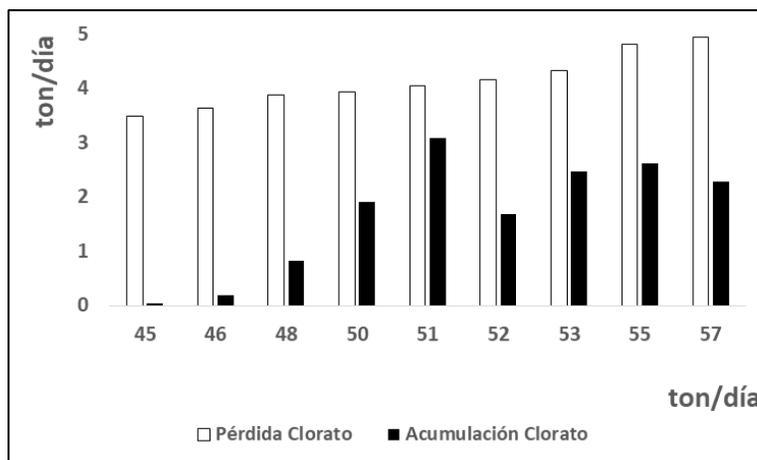


Figura 29. Pérdida de clorato y acumulación para rangos de producción de 45 hasta 57 ton/día.

De acuerdo a Figura 29, se comprueba que no existe punto óptimo de operación al producir más de 45 ton/día de dióxido de cloro, la eficiencia disminuye a medida que la producción aumenta, por lo que las pérdidas seguirán aumentando si es que esta alta producción se mantiene en un tiempo significativo.

6.3 Análisis económico

Tabla 13. Tabla de costos totales teniendo en cuenta eficiencias reales por toneladas de producción.

| Producción ClO ₂ | Pérdida Clorato | Costo diario | Costo Anual |
|-----------------------------|-----------------|--------------|-------------|
| Ton/día | Ton/día | USD/día | USD/año |
| 45 | 3,5 | \$2.604 | \$911.278 |
| 46 | 3,65 | \$2.715 | \$950.332 |
| 48 | 3,88 | \$2.886 | \$1.010.216 |
| 50 | 3,94 | \$2.931 | \$1.025.838 |
| 51 | 4,05 | \$3.013 | \$1.054.478 |
| 52 | 4,17 | \$3.102 | \$1.085.722 |
| 53 | 4,34 | \$3.229 | \$1.129.984 |
| 55 | 4,82 | \$3.586 | \$1.254.959 |
| 57 | 4,95 | \$3.682 | \$1.288.807 |

Analizando los dos polos opuestos, para operar a 45 ton/día y a 57 ton/día se puede ver una gran diferencia de USD \$380.000 anual (Tabla 13). Los costos diarios de pérdidas de clorato de sodio correspondientes a un aumento de producción son significativos teniendo en cuenta que a los gastos en pérdidas se suman los gastos asociados al proceso como lo es el vapor y otros gastos indirectos.

Tabla 14. Pérdidas totales año 2018 de acuerdo a días de producción en intervalos seleccionados.

| Rangos de producción (ton/día) | Días | Pérdida NaClO ₃ (ton) |
|--------------------------------|------|----------------------------------|
| 30-46 | 206 | 721 |
| 46-47 | 27 | 99 |
| 47-50 | 67 | 260 |
| 50-52 | 27 | 109 |
| 52-53 | 8 | 33 |
| 53-55 | 10 | 43 |
| 55-56 | 4 | 19 |
| 56-58 | 5 | 25 |
| Detenciones | 11 | 0 |
| Total | 365 | 1309 |
| Pérdida (USD) | | \$974.249 |

Tabla 15. Pérdidas totales del año 2019 (Enero-Julio) de acuerdo a días de producción de acuerdo en intervalos seleccionados.

| Rangos de producción (ton/día) | Días | Pérdida NaClO ₃ (ton) |
|--------------------------------|------|----------------------------------|
| 30-46 | 62 | 217 |
| 46-47 | 12 | 44 |
| 47-50 | 46 | 178 |
| 50-52 | 32 | 130 |
| 52-53 | 13 | 54 |
| 53-55 | 13 | 56 |
| 55-56 | 5 | 24 |
| 56-58 | 5 | 25 |
| Detenciones | 15 | 0 |
| Total | 203 | 728 |
| Pérdida (USD) | | \$541.927 |

Las producciones obtenidas en los años 2018 (Tabla 14) y 2019 (Tabla 15) fueron menores a 52 ton/día, a pesar de esto, hay un impacto significativo en gastos establecidos por pérdidas en el sistema, sobre todo si es que se planifica trabajar a altas producciones constantemente en años posteriores (mayor a 53 ton/día de dióxido de cloro).

6.4 Estrategia operacional

Con relación a la estrategia operacional se recomienda trabajar a la menor producción posible en tanto las líneas de blanqueo lo permitan, esto debido a que hay una mayor eficiencia del proceso y una menor pérdida de clorato de sodio.

Como existe una demanda de dióxido de cloro dependiendo de las producciones de las líneas de pulpa, se recomienda establecer una medición diaria de clorato de sodio en la etapa de dióxido de cloro, referido a un muestreo diario de dióxido de cloro en la descarga de la torre de absorción y en la descarga de los TK de almacenamiento. De esta manera tener un control de la pérdida de reactivo diario y además formar una base de datos para analizar el comportamiento de la planta en relación a las pérdidas diarias mediante los software Lab21 y WEDGE 8.0. A toda esta información, además debe considerar datos obtenidos en la etapa de manejo de sales, específicamente en la descarga del tanque disolvedor hacia evaporadores y los datos de entrada al sistema correspondiente al reactivo de clorato de sodio.

La determinación de clorato de sodio en la solución de dióxido de cloro se realizaría con el instructivo desarrollado en esta habilitación profesional entregado a la superintendencia de proceso.

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

A partir del desarrollo de esta Habilitación Profesional, se puede concluir lo siguiente:

- Se logró evaluar el rendimiento de la planta generadora de dióxido de cloro de acuerdo a las eficiencias de reacción, en relación al consumo de clorato de sodio considerando producciones de 46, 48, 50 y 52 ton/día de dióxido de cloro mediante el uso de software de base de datos obteniendo eficiencias de 95,3%, 94,5%, 93,4% y 92,8% respectivamente.
- Se detectó que las pérdidas de clorato de sodio aumentan hasta un 7% en el sistema, a medida que la producción de dióxido de cloro aumenta, se determinaron pérdidas para los rangos de 45 a 57 ton/día mediante análisis de laboratorio, obteniendo pérdidas de 3,5 a 4,95 ton/día.
- El mayor porcentaje de pérdidas en la planta de generación de dióxido de cloro se presenta en la etapa de absorción de dióxido de cloro (3,5 - 4,95 ton/día), mostrando un aumento constante a medida que incrementa la producción de dióxido de cloro y no en la descarga del tanque disolvedor, cuyo valor es relativamente constante (0,45 ton/día).
- El mayor descenso de eficiencia de la planta se muestra en los rangos de producción superiores a 50 toneladas debido a que la planta de dióxido de cloro se vuelve inestable en relación a las concentraciones y al nivel del generador, esto provoca una reacción deficiente (bajo 96%), lo que puede significar un aumento del tiempo de residencia de las sales en la recirculación del generador, provocando una disminución en el tamaño de partícula, lo que puede facilitar su arrastre hacia la torre de absorción.
- De acuerdo al análisis técnico económico, se demuestra que a mayor producción hay mayor pérdida de clorato por lo tanto mayor gasto económico en el proceso, calculando valores de pérdida de hasta USD M\$1.290 anuales.
- Con el análisis de clorato de sodio se logró detectar pérdidas en zonas no estudiadas previamente, y con ello se logró establecer un instructivo de clorato de sodio en solución de dióxido de cloro para realizar mediciones desde muestreo diarios.

7.2 Recomendaciones

En base a los resultados obtenidos de esta habilitación profesional, se presentan las siguientes recomendaciones:

- Trabajar con valores operacionales seteados a la menor producción posible de dióxido de cloro, si es que las variables de producción lo permiten, debido a que la planta de generación con trabajo mayor a 45 ton/día pierde eficiencia.
- Realizar un seguimiento y muestreo diario mediante una medición de clorato de sodio en la etapa de dióxido de cloro, aplicado a las muestras diarias de dióxido de cloro en la descarga de torre de absorción y en la descarga de los TK de almacenamiento, con el fin de tener un control de la pérdida y una base de datos para poder analizar el comportamiento de la planta.
- Realizar una búsqueda de opciones de control para las variables operaciones ligadas a la etapa de generación de dióxido de cloro, y con esto disminuir el arrastre de clorato de sodio hacia la torre de absorción relacionadas a estequiometría de reacción, nivel del generador y concentración de reactivos.

8 REFERENCIAS

- Arauco. (2011). [REDACTED] – Proceso. Presentación CFI
- Arriagada, M. R. R. (2012). *Implementación de nuevas secuencias de blanqueo en pulpa de eucalipto para maximizar el desarrollo de la fibra y minimizar la materia orgánica en el efluente* (Doctoral dissertation, Universidad de Concepción). Retrieved from <http://www.eula.cl/giba/wp-content/uploads/2017/09/tesis-maribel-rivera-2012.pdf>
- Allison, B. J. A. (2004). Liquor Composition Control Strategy for Chlorine Dioxide Generators. In *PacWest Conference, Jasper, AB, Session* (Vol. 3, pp. 19-22).
- Celulosa Arauco y Constitución S.A. (2017). Memoria Arauco 2017. Retrieved from https://www.arauco.cl/peru/wpcontent/uploads/sites/22/2017/07/MEMORIA_ARAUCO_2017_FINAL.pdf
- Chlorate de potassium (2000). Chlorate de sodium, *Fiche toxicol. n° 217*, Paris: Institut national de recherche et de sécurité. 4pp
- Eka Chemicals. (2005). SVP-SCW® Operation Manual. Talcahuano, Chile: Akzo Nobel.
- Ek, M., Gellerstedt, G., & Henriksson, G. (Eds.). (2009). *Pulping chemistry and technology* (Vol. 2). Walter de Gruyter
- KEMASUD, & Marambio, A. (2017). Producción estable de Dióxido de Cloro. In A. Marambio (Ed.), *Capacitación ClO2* (pp. 1–90). Santiago, Chile: Kemasud.
- Lenntech. (2017). Chlorine dioxide as a disinfectant. Retrieved from <https://www.lenntech.es/procesos/desinfeccion/quimica/desinfectantes-dioxido-de-cloro.htm>
- Moraes, F. D. A. B. (2016). Modelo para estimativa de perdas de reagentes em processo de produção de dióxido de cloro. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, 2(1), 01-17.
- Nouryon. (2018). SVP-SCW Process Diagram. Retrieved from <https://eka.nouryon.com/globalassets/image-2018-nouryon-svp-scw-process-diagram.pdf>
- Sixta, H. (2008). *Handbook of pulp*. (H. Sixta, Ed.) *Handbook of pulp* (Vol. 1-2). Wiley-VCH. <http://doi.org/10.1002/9783527619887>
- Suhr.M., Klein, G., Kourti, I., Gonzalo, M. R., Santoja, G. G., Roudier, S., & Sancho, L. D. (2015). *Best Available Techniques. Reference Document for the Production of Pulp, Paper and Board*. <https://doi.org/10.2791/370629>

9. ANEXOS

Anexo 1. Balances de masa para obtención de eficiencias y pérdidas de clorato según software filtrando por toneladas producidas de dióxido de cloro.

| 46 | | Producción ClO2 ton/día | Eficiencia | NaClO3 total no Rx ton/día | NaClO3 no Rx diseño ton/día | NaClO3 hacia evaporadores ton/día | NaClO3 acumulación y tk ClO2 100% ton/día | NaClO3 acumulación y tk ClO2 96% ton/día |
|-----------------|------------------------|----------------------------|-------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|--|---|
| Fecha | ton clorato ton/día | | | | | | | |
| 13-02-2019 | 77,63345728 | 46,40156081 | 0,94436688 | 4,318991194 | 1,213652903 | 0,232441824 | 4,08654937 | 0,981211079 |
| 17-02-2019 | 78,31874332 | 46,89178854 | 0,94599355 | 4,229717434 | 1,096967701 | 0,468741055 | 3,760976379 | 0,628226646 |
| 14-03-2019 | 75,03484562 | 45,55942001 | 0,9593394 | 3,050962004 | 0,049568179 | 0,419492282 | 2,631469722 | 0 |
| 22-03-2019 | 75,79925934 | 46,4932148 | 0,96912925 | 2,339979964 | 0 | 0,211312222 | 2,128667742 | 0 |
| 26-04-2019 | 77,01344781 | 46,69142832 | 0,95791656 | 3,240991067 | 0,160453155 | 0,312869044 | 2,928122024 | 0 |
| 07-05-2019 | 77,186472 | 46,70535626 | 0,95605436 | 3,39200911 | 0,30455023 | 0,26307174 | 3,128937371 | 0,041478491 |
| 12-06-2019 | 75,37108153 | 45,03429343 | 0,94405151 | 4,216897913 | 1,202054652 | 0,365448291 | 3,851449622 | 0,836606361 |
| 13-06-2019 | 76,26557456 | 45,85375993 | 0,94995601 | 3,816633876 | 0,766010893 | 0,406555798 | 3,410078078 | 0,359455096 |
| PROMEDIO | 76,57786018 | 46,20385276 | 0,95335094 | 3,57577282 | 0,599157214 | 0,349991532 | 3,240781289 | 0,355872209 |

| 48 | | Producción ClO2 ton/día | Eficiencia | NaClO3 total no Rx ton/día | NaClO3 no Rx diseño ton/día | NaClO3 hacia evaporadores ton/día | NaClO3 acumulación y tk ClO2 100% ton/día | NaClO3 acumulación y tk ClO2 96% ton/día |
|-----------------|------------------------|----------------------------|-------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|--|---|
| Fecha | ton clorato ton/día | | | | | | | |
| 18-02-2019 | 79,12788814 | 47,38459478 | 0,94616022 | 4,260228381 | 1,095112855 | 0,531308551 | 3,72891983 | 0,563804304 |
| 19-02-2019 | 80,42000381 | 48,13263544 | 0,94565482 | 4,370439808 | 1,153639656 | 0,414180854 | 3,956258954 | 0,739458802 |
| 22-02-2019 | 81,15481672 | 48,67758737 | 0,94770207 | 4,24422867 | 0,998036001 | 0,347735126 | 3,896493544 | 0,650300875 |
| 10-03-2019 | 80,21109358 | 47,45286444 | 0,93472764 | 5,235567771 | 2,027124028 | 0,252590475 | 4,982977296 | 1,774533553 |
| 23-03-2019 | 78,32047364 | 47,2467054 | 0,95313257 | 3,67067912 | 0,537860175 | 0,197142983 | 3,473536137 | 0,340717191 |
| 24-04-2019 | 74,57735366 | 48,49169708 | 0,94547366 | 4,418566672 | 1,612710978 | 0,444788617 | 4,151016507 | 1,16792361 |
| 05-05-2019 | 78,861576 | 47,1006455 | 0,9436664 | 4,442556104 | 1,288093064 | 0,226777509 | 4,215778595 | 1,061315555 |
| 11-05-2019 | 80,685096 | 48,24212826 | 0,94469197 | 4,462533345 | 1,235129505 | 0,289892402 | 4,172640943 | 0,945237103 |
| 19-05-2019 | 81,293616 | 48,82696796 | 0,9489873 | 4,147006621 | 0,895261981 | 0,137029055 | 4,009977566 | 0,758232926 |
| 27-05-2019 | 81,82728 | 48,71596815 | 0,94065487 | 4,856050317 | 1,582959117 | 0,421679797 | 4,434370521 | 1,161279321 |
| 16-06-2019 | 81,57581442 | 48,87327352 | 0,9466013 | 4,356042256 | 1,093009679 | 0,458528493 | 3,897513763 | 0,63481186 |
| PROMEDIO | 79,82318291 | 48,10409708 | 0,94522298 | 4,405809006 | 1,228994276 | 0,338332169 | 4,083589423 | 0,890662107 |

| 50 | | Producción ClO2 ton/día | Eficiencia | NaClO3 total no Rx ton/día | NaClO3 no Rx diseño ton/día | NaClO3 hacia evaporadores ton/día | NaClO3 acumulación y tk ClO2 100% ton/día | NaClO3 acumulación y tk ClO2 96% ton/día |
|-----------------|------------------------|----------------------------|-------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|--|---|
| Fecha | ton clorato ton/día | | | | | | | |
| 01-02-2019 | 85,13393589 | 50,50017274 | 0,93723228 | 5,343662969 | 1,938305533 | 0,33762301 | 5,006039959 | 1,600682523 |
| 27-02-2019 | 83,89128665 | 49,55530078 | 0,93331952 | 5,593911421 | 2,238259955 | 0,199315631 | 5,39495979 | 2,038944324 |
| 02-03-2019 | 84,87934654 | 50,53830235 | 0,94075321 | 5,028828826 | 1,633654964 | 0,257138491 | 4,771690335 | 1,376516473 |
| 20-03-2019 | 84,64536487 | 49,89920268 | 0,93142419 | 5,80462464 | 2,418810045 | 0,317742258 | 5,486882382 | 2,101067787 |
| 14-04-2019 | 85,84690506 | 50,30379469 | 0,92583414 | 6,36690944 | 2,933033237 | 0,329117208 | 6,037792231 | 2,603916029 |
| 22-04-2019 | 83,68866766 | 49,51515018 | 0,93482116 | 5,454730372 | 2,107183666 | 0,934399033 | 4,520331339 | 1,172784632 |
| 27-04-2019 | 85,31833939 | 50,37075331 | 0,93280988 | 5,732549159 | 2,319815583 | 0,372317557 | 5,360231602 | 1,947498026 |
| 09-05-2019 | 86,09712 | 50,87076696 | 0,9335482 | 5,721308203 | 2,277423403 | 0,285326497 | 5,435981707 | 1,992096907 |
| 12-05-2019 | 82,576584 | 49,04591731 | 0,93843249 | 5,084034647 | 1,780971287 | 0,312247242 | 4,771787405 | 1,468724045 |
| 16-05-2019 | 84,56676 | 50,35245224 | 0,94075822 | 5,009885466 | 1,627215066 | 0,239590047 | 4,770295419 | 1,387625019 |
| PROMEDIO | 84,66443101 | 50,09518132 | 0,93489333 | 5,514044514 | 2,127467274 | 0,358481697 | 5,155562817 | 1,768985577 |

| 52 | | Producción ClO2 ton/día | Eficiencia | NaClO3 total no Rx ton/día | NaClO3 no Rx diseño ton/día | NaClO3 hacia evaporadores ton/día | NaClO3 acumulación y tk ClO2 100% ton/día | NaClO3 acumulación y tk ClO2 96% ton/día |
|-----------------|------------------------|----------------------------|-------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|--|---|
| Fecha | ton clorato ton/día | | | | | | | |
| 17-03-2019 | 87,67813204 | 52,21605289 | 0,94095713 | 5,176768479 | 1,669643197 | 0,476837196 | 4,699931283 | 1,192806002 |
| 06-04-2019 | 87,50446418 | 51,55019686 | 0,93080178 | 6,055153135 | 2,554974568 | 0,517922955 | 5,53723018 | 2,037051613 |
| 01-06-2019 | 88,3881424 | 51,31263712 | 0,91724936 | 7,314175743 | 3,778650047 | 0,486920667 | 6,827255076 | 3,29172938 |
| PROMEDIO | 87,85691287 | 51,69296229 | 0,92966942 | 6,182032452 | 2,667755937 | 0,493893606 | 5,688138847 | 2,173862332 |

Anexo 2. Balance específico para la obtención de pérdidas de clorato de sodio para una producción de 46 ton/día de dióxido de cloro.

| 46 | | | | | | | |
|-------------------------------|------------------------|-------------|-----------------------|---------|-----------------------------------|---|--|
| Alimentación a planta de ClO2 | | | | | | | |
| Fecha | ton clorato ton/día | %p/p NaClO3 | ton NaClO3 ton/día | %p/p Cl | ton Cl alimentación ton Cl/día | ton Cl como NaClO3 Alimentacion ton NaClO3/día | NaClO3 total de alimentacion ton NaClO3/día |
| 13-02-2019 | 77,63345728 | 98,69 | 77,63345728 | 0,012 | 0,931601487 | 2,794804462 | 80,42826174 |
| 17-02-2019 | 78,31874332 | 98,69 | 78,31874332 | 0,012 | 0,93982492 | 2,81947476 | 81,13821808 |
| 14-03-2019 | 75,03484562 | 98,69 | 75,03484562 | 0,012 | 0,900418147 | 2,701254442 | 77,73610007 |
| 22-03-2019 | 75,79925934 | 98,69 | 75,79925934 | 0,012 | 0,909591112 | 2,728773336 | 78,52803268 |
| 26-04-2019 | 77,01344781 | 98,69 | 77,01344781 | 0,012 | 0,924161374 | 2,772484121 | 79,78593193 |
| 07-05-2019 | 77,186472 | 98,69 | 77,186472 | 0,012 | 0,926237664 | 2,778712992 | 79,96518499 |
| 12-06-2019 | 75,37108153 | 98,69 | 75,37108153 | 0,012 | 0,904452978 | 2,713358935 | 78,08444046 |
| 13-06-2019 | 76,26557456 | 98,69 | 76,26557456 | 0,012 | 0,915186895 | 2,745560684 | 79,01113525 |
| PROMEDIO | 76,57786018 | 98,69 | 76,57786018 | 0,012 | 0,918934322 | 2,756802967 | 79,33466315 |

| Linea a Tk de almacenamiento de ClO2 | | | | | | |
|--|----------------------------|-----------------------------|-------------------------|----------------------------|---------------------------|--|
| Flujo salida torre de absorcion L/s | Producción ClO2 ton/día | ClO2 como NaClO3 ton/día | concentracion Cl g/l | toneladas de Cl ton/día | Cl como NaClO3 ton/día | Toneladas de ClO3 como NaClO3 ton/día |
| 54,04 | 46,40156081 | 73,2113515 | 0,09 | 0,42021504 | 1,26064512 | - |
| 54,606 | 46,89178854 | 73,98482191 | 0,09 | 0,424616256 | 1,273848768 | - |
| 53,45 | 45,55942001 | 71,88264046 | 0,09 | 0,4156272 | 1,2468816 | - |
| 55,8 | 46,4932148 | 73,35596112 | 0,09 | 0,4339008 | 1,3017024 | - |
| 55,6 | 46,69142832 | 73,66869802 | 0,09 | 0,4323456 | 1,2970368 | - |
| 52,9 | 46,70535626 | 73,69067321 | 0,09 | 0,4113504 | 1,2340512 | - |
| 53,72 | 45,03429343 | 71,05410741 | 0,09 | 0,41772672 | 1,25318016 | - |
| 54,12 | 45,85375993 | 72,34704344 | 0,09 | 0,42083712 | 1,26251136 | - |
| 54,2795 | 46,20385276 | 72,89941214 | 0,09 | 0,422077392 | 1,266232176 | 1,9732 |

| Descarga tk disolvedor hacia evaporadores | | | | | |
|---|-----------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------|-------------------------------|
| Flujo hacia evaporadores L/s | concentracion NaClO3 g/l | ton NaClO3 ton/día | concentracion Cl g/l | ton Cl ton/día | ton Cl como NaClO3 ton/día |
| 1,9 | 1,41 | 0,2314656 | 0,073 | 0,01198368 | 0,03595104 |
| 3,04 | 3 | 0,787968 | 0,038 | 0,009980928 | 0,029942784 |
| 1,83 | 2,65 | 0,4189968 | 0,336 | 0,053125632 | 0,159376896 |
| 1,29 | 1,89 | 0,21065184 | 0,338 | 0,037672128 | 0,113016384 |
| 2,03 | 1,8 | 0,3157056 | 0,223 | 0,039112416 | 0,117337248 |
| 1,86 | 1,63 | 0,26194752 | 0,249 | 0,040015296 | 0,120045888 |
| 1,96 | 2,15 | 0,3640896 | 0,168 | 0,028449792 | 0,085349376 |
| 2,06 | 2,28 | 0,40580352 | 0,117 | 0,020824128 | 0,062472384 |
| 1,99625 | 2,10125 | 0,37457856 | 0,1928 | 0,0301 | 0,0904 |

| | |
|--------------|-------|
| Eficiencia % | 0,953 |
|--------------|-------|

| | | |
|--|-------------|-------------|
| NaClO3 Alimentacion (ton/día) | 79,33466315 | |
| NaClO3 Salida línea hacia evaporadores (ton/día) | 0,4650 | 0,465 |
| NaClO3 ClO2 (ClO2+Cl) (ton/día) | 74,16564431 | 1,266232176 |
| Pérdidas sin contar ClO3 (ton/día) | | 1,731232176 |

| | |
|---|-------------|
| Clorato no reaccionado con eficiencia (ton/día) | 3,728729168 |
|---|-------------|

| | |
|--|-------------|
| NaClO3 no rx. hacia Tk ClO2 como ClO3 mas acumulacion(ton/día) | 1,997496992 |
|--|-------------|

Anexo 3. Balance específico para la obtención de pérdidas de clorato de sodio para una producción de 48 ton/día de dióxido de cloro.

| 48 | | | | | | | |
|-------------------------------|------------------------|-------------|-----------------------|---------|-----------------------------------|---|--|
| Alimentación a planta de ClO2 | | | | | | | |
| Fecha | ton clorato ton/día | %p/p NaClO3 | ton NaClO3 ton/día | %p/p Cl | ton Cl alimentación ton Cl/día | ton Cl como NaClO3 Alimentación ton NaClO3/día | NaClO3 total de alimentación ton NaClO3/día |
| 18-02-2019 | 79,12788814 | 98,69 | 79,12788814 | 0,012 | 0,949534658 | 2,848603973 | 81,97649211 |
| 19-02-2019 | 80,42000381 | 98,69 | 80,42000381 | 0,012 | 0,965040046 | 2,895120137 | 83,31512395 |
| 22-02-2019 | 81,15481672 | 98,69 | 81,15481672 | 0,012 | 0,973857801 | 2,921573402 | 84,07639012 |
| 10-03-2019 | 80,21109358 | 98,69 | 80,21109358 | 0,012 | 0,962533123 | 2,887599369 | 83,09869295 |
| 23-03-2019 | 78,32047364 | 98,69 | 78,32047364 | 0,012 | 0,939845684 | 2,819537051 | 81,1400107 |
| 24-04-2019 | 74,57735366 | 98,69 | 74,57735366 | 0,012 | 0,894928244 | 2,684784732 | 77,26213839 |
| 05-05-2019 | 78,861576 | 98,69 | 78,861576 | 0,012 | 0,946338912 | 2,839016736 | 81,70059274 |
| 11-05-2019 | 80,685096 | 98,69 | 80,685096 | 0,012 | 0,968221152 | 2,904663456 | 83,58975946 |
| 19-05-2019 | 81,293616 | 98,69 | 81,293616 | 0,012 | 0,975523392 | 2,926570176 | 84,22018618 |
| 27-05-2019 | 81,82728 | 98,69 | 81,82728 | 0,012 | 0,98192736 | 2,94578208 | 84,77306208 |
| 16-06-2019 | 81,57581442 | 98,69 | 81,57581442 | 0,012 | 0,978909773 | 2,936729319 | 84,51254374 |
| PROMEDIO | 79,8231829 | 98,69 | 79,82318291 | 0,012 | 0,957878195 | 2,873634585 | 82,69681749 |

| Línea a tk de almacenamiento de ClO2 | | | | | | |
|--|----------------------------|-----------------------------|-------------------------|----------------------------|---------------------------|--|
| Flujo salida torre de absorción L/s | Producción ClO2 ton/día | ClO2 como NaClO3 ton/día | concentración Cl g/l | toneladas de Cl ton/día | Cl como NaClO3 ton/día | Toneladas de ClO3 como NaClO3 ton/día |
| 53,71 | 47,3845948 | 74,76236066 | 0,09 | 0,41764896 | 1,25294688 | - |
| 56,52 | 48,1326354 | 75,94260259 | 0,09 | 0,43949952 | 1,31849856 | - |
| 57,93 | 48,6775874 | 76,80241563 | 0,09 | 0,45046368 | 1,35139104 | - |
| 55,8 | 47,4528644 | 74,870075 | 0,09 | 0,4339008 | 1,3017024 | - |
| 54,29 | 47,2467054 | 74,54480185 | 0,09 | 0,42215904 | 1,26647712 | - |
| 57,27 | 48,4916971 | 76,50912206 | 0,09 | 0,44533152 | 1,33599456 | - |
| 55,68 | 47,1006455 | 74,3143518 | 0,09 | 0,43296768 | 1,29890304 | - |
| 55,7 | 48,2421283 | 76,11535793 | 0,09 | 0,4331232 | 1,2993696 | - |
| 57,07 | 48,8269680 | 77,03810501 | 0,09 | 0,44377632 | 1,33132896 | - |
| 57,34 | 48,7159682 | 76,86297198 | 0,09 | 0,44587584 | 1,33762752 | - |
| 56,99 | 48,8732735 | 77,11116489 | 0,09 | 0,44315424 | 1,32946272 | - |
| 56,20909091 | 48,1040971 | 75,8975754 | 0,09 | 0,437081891 | 1,311245673 | 2,81 |

| Descarga tk disolvedor hacia evaporadores | | | | | | |
|---|-----------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------|-------------------------------|--|
| Flujo hacia evaporadores L/s | concentración NaClO3 g/l | ton NaClO3 ton/día | concentración Cl g/l | ton Cl ton/día | ton Cl como NaClO3 ton/día | |
| 1,87 | 3,27 | 0,52832736 | 0,035 | 0,00565488 | 0,01696464 | |
| 1,87 | 2,55 | 0,4119984 | 0,051 | 0,008239968 | 0,024719904 | |
| 1,89 | 2,122 | 0,346514112 | 0,057 | 0,009307872 | 0,027923616 | |
| 1,85 | 1,58 | 0,2525472 | 0,376 | 0,06009984 | 0,18029952 | |
| 1,31 | 1,74 | 0,19694016 | 0,311 | 0,035200224 | 0,105600672 | |
| 1,11 | 1,55 | 0,1486512 | 0,257 | 0,024647328 | 0,073941984 | |
| 1,91 | 1,34 | 0,22113216 | 0,317 | 0,052312608 | 0,156937824 | |
| 1,96 | 1,71 | 0,28957824 | 0,335 | 0,05673024 | 0,17019072 | |
| 1,98 | 0,8 | 0,1368576 | 0,486 | 0,083140992 | 0,249422976 | |
| 2,34 | 2,08 | 0,42052608 | 0,214 | 0,043265664 | 0,129796992 | |
| 1,9 | 2,78 | 0,4563648 | 0,097 | 0,01592352 | 0,04777056 | |
| 1,817272727 | 1,956545 | 0,309949 | 0,230545 | 0,035866 | 0,107597 | |

| | |
|------------|-------|
| Eficiencia | 0,945 |
|------------|-------|

| | | |
|--|-------------|----------------------|
| NaClO3 Alimentación (ton/día) | 82,69681749 | Sin ClO2 como NaClO3 |
| NaClO3 Salida línea hacia evaporadores (ton/día) | 0,417546 | 0,417546 |
| NaClO3 ClO2 (ClO2+Cl) (ton/día) | 77,20882107 | 1,311245673 |
| Pérdidas sin contar ClO3 (ton/día) | | 1,728791673 |

| | |
|---|-------------|
| Clorato no reaccionado con eficiencia (ton/día) | 4,548324962 |
|---|-------------|

| | |
|--|-------------|
| NaClO3 no rx. hacia Tk ClO2 como ClO3 mas acumulacion(ton/día) | 2,819533289 |
|--|-------------|

Anexo 4. Balance específico para la obtención de pérdidas de clorato de sodio para una producción de 50 ton/día de dióxido de cloro.

| 50 | | | | | | | |
|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|---------|---------------------|---------------------------------|------------------------------|
| Alimentación a planta de ClO2 | | | | | | | |
| Fecha | ton clorato | %p/p NaClO3 | ton NaClO3 | %p/p Cl | ton Cl alimentacion | ton Cl como NaClO3 Alimentacion | NaClO3 total de alimentacion |
| | ton/día | | ton/día | | ton Cl/día | ton NaClO3/día | ton NaClO3/día |
| 01-02-2019 | 85,13393589 | 98,69 | 85,13393589 | 0,012 | 1,021607231 | 3,064821692 | 88,19875758 |
| 27-02-2019 | 83,89128665 | 98,69 | 83,89128665 | 0,012 | 1,00669544 | 3,02008632 | 86,91137297 |
| 02-03-2019 | 84,87934654 | 98,69 | 84,87934654 | 0,012 | 1,018552159 | 3,055656476 | 87,93500302 |
| 20-03-2019 | 84,64536487 | 98,69 | 84,64536487 | 0,012 | 1,015744378 | 3,047233135 | 87,692598 |
| 14-04-2019 | 85,84690506 | 98,69 | 85,84690506 | 0,012 | 1,030162861 | 3,090488582 | 88,93739364 |
| 22-04-2019 | 83,68866766 | 98,69 | 83,68866766 | 0,012 | 1,004264012 | 3,012792036 | 86,7014597 |
| 27-04-2019 | 85,31833939 | 98,69 | 85,31833939 | 0,012 | 1,023820073 | 3,071460218 | 88,38979961 |
| 09-05-2019 | 86,09712 | 98,69 | 86,09712 | 0,012 | 1,03316544 | 3,09949632 | 89,19661632 |
| 12-05-2019 | 82,576584 | 98,69 | 82,576584 | 0,012 | 0,990919008 | 2,972757024 | 85,54934102 |
| 16-05-2019 | 84,56676 | 98,69 | 84,56676 | 0,012 | 1,01480112 | 3,04440336 | 87,61116336 |
| PROMEDIO | 84,66443101 | 98,69 | 84,66443101 | 0,012 | 1,015973172 | 3,047919516 | 87,71235052 |

| Línea a Tk de almacenamiento de ClO2 | | | | | | |
|--------------------------------------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|----------------|-------------------------------|
| Flujo salida torre de absorcion | Producción ClO2 | ClO2 como NaClO3 | concentracion Cl | toneladas de Cl | Cl como NaClO3 | Toneladas de ClO3 como NaClO3 |
| L/s | ton/día | ton/día | g/l | ton/día | ton/día | ton/día |
| 61,17 | 50,50017274 | 79,67805032 | 0,09 | 0,47565792 | 1,42697376 | - |
| 59,91 | 49,55530078 | 78,18725234 | 0,09 | 0,46586016 | 1,39758048 | - |
| 60,78 | 50,53830235 | 79,73821038 | 0,09 | 0,47262528 | 1,41787584 | - |
| 60,29 | 49,89920268 | 78,72985311 | 0,09 | 0,46881504 | 1,40644512 | - |
| 58,1 | 50,30379469 | 79,36820941 | 0,09 | 0,4517856 | 1,3553568 | - |
| 57,81 | 49,51515018 | 78,12390362 | 0,09 | 0,44953056 | 1,34859168 | - |
| 60,9 | 50,37075331 | 79,47385523 | 0,09 | 0,4735584 | 1,4206752 | - |
| 59,1 | 50,87076696 | 80,26276565 | 0,09 | 0,4595616 | 1,3786848 | - |
| 56,9 | 49,04591731 | 77,38355843 | 0,09 | 0,4424544 | 1,3273632 | - |
| 58,1 | 50,35245224 | 79,4449802 | 0,09 | 0,4517856 | 1,3553568 | - |
| 59,306 | 50,09518132 | 79,03906387 | 0,09 | 0,461163456 | 1,383490368 | 3,942 |

| Descarga tk disolvedor hacia evaporadores | | | | | |
|---|----------------------|-------------|------------------|-------------|--------------------|
| Flujo hacia evaporadores | concentracion NaClO3 | ton NaClO3 | concentracion Cl | ton Cl | ton Cl como NaClO3 |
| L/s | g/l | ton/día | g/l | ton/día | ton/día |
| 2,21 | 1,76 | 0,33606144 | 0,049 | 0,009356256 | 0,028068768 |
| 2,05 | 1,121 | 0,19855152 | 0,038 | 0,00673056 | 0,02019168 |
| 1,89 | 1,57 | 0,25637472 | 0,062 | 0,010124352 | 0,030373056 |
| 1,87 | 1,96 | 0,31667328 | 0,281 | 0,045400608 | 0,136201824 |
| 2,28 | 1,66 | 0,32700672 | 0,087 | 0,017138304 | 0,051414912 |
| 2,09 | 5,1 | 0,9209376 | 0,248 | 0,044782848 | 0,134348544 |
| 2,06 | 2,08 | 0,37020672 | 0,276 | 0,049123584 | 0,147370752 |
| 2,07 | 1,6 | 0,2861568 | 0,277 | 0,049540896 | 0,148622688 |
| 2,12 | 1,7 | 0,3113856 | 0,413 | 0,075648384 | 0,226945152 |
| 2,38 | 1,164 | 0,239355648 | 0,232 | 0,047706624 | 0,143119872 |
| 2,102 | 1,9715 | 0,356271005 | 0,1963 | 0,035555242 | 0,106665725 |

| | |
|------------|-------|
| Eficiencia | 0,934 |
|------------|-------|

| | | |
|--|-------------|----------------------|
| NaClO3 Alimentacion (ton/día) | 87,71235052 | Sin ClO2 como NaClO3 |
| NaClO3 Salida linea hacia evaporadores (ton/día) | 0,462937 | |
| NaClO3 ClO2 (ClO2+Cl) (ton/día) | 80,42255424 | |
| Pérdidas sin contar ClO3 (ton/día) | 1,846427368 | |

| | |
|---|-------------|
| Clorato no reaccionado con eficiencia (ton/día) | 5,789015134 |
|---|-------------|

| | |
|--|-------------|
| NaClO3 no rx. hacia Tk ClO2 como ClO3 mas acumulacion(ton/día) | 3,942587766 |
|--|-------------|

Anexo 5. Balance específico para la obtención de pérdidas de clorato de sodio para una producción de 52 ton/día de dióxido de cloro.

| 52 | | | | | | | |
|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|---------|---------------------|---------------------------------|------------------------------|
| Alimentación a planta de ClO2 | | | | | | | |
| Fecha | ton clorato | %p/p NaClO3 | ton NaClO3 | %p/p Cl | ton Cl alimentacion | ton Cl como NaClO3 Alimentacion | NaClO3 total de alimentacion |
| | ton/día | | ton/día | | ton Cl/día | ton NaClO3/día | ton NaClO3/día |
| 17-03-2019 | 87,67813204 | 98,69 | 87,67813204 | 0,012 | 1,052137585 | 3,156412754 | 90,8345448 |
| 06-04-2019 | 87,50446418 | 98,69 | 87,50446418 | 0,012 | 1,05005357 | 3,15016071 | 90,65462489 |
| 01-06-2019 | 88,3881424 | 98,69 | 88,3881424 | 0,012 | 1,060657709 | 3,181973126 | 91,57011552 |
| PROMEDIO | 87,85691287 | 98,69 | 87,85691287 | 0,012 | 1,054282954 | 3,162848863 | 91,01976174 |

| Linea a Tk de almacenamiento de ClO2 | | | | | | | |
|--------------------------------------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|----------------|-------------------------------|--|
| Flujo salida torre de absorcion | Producción ClO2 | ClO2 como NaClO3 | concentracion Cl | toneladas de Cl | Cl como NaClO3 | Toneladas de ClO3 como NaClO3 | |
| L/s | ton/día | ton/día | g/l | ton/día | ton/día | ton/día | |
| 62,08 | 52,21605289 | 82,38532789 | 0,09 | 0,48273408 | 1,44820224 | - | |
| 61,56 | 51,55019686 | 81,33475505 | 0,09 | 0,47869056 | 1,43607168 | - | |
| 59,27 | 51,31263712 | 80,95993857 | 0,09 | 0,46088352 | 1,38265056 | - | |
| 60,97 | 51,69296229 | 81,56000717 | 0,09 | 0,47410272 | 1,42230816 | 4,29 | |

| Descarga tk disolvedor hacia evaporadores | | | | | |
|---|----------------------|-------------|------------------|-------------|--------------------|
| Flujo hacia evaporadores | concentracion NaClO3 | ton NaClO3 | concentracion Cl | ton Cl | ton Cl como NaClO3 |
| L/s | g/l | ton/día | g/l | ton/día | ton/día |
| 2,06 | 2,667 | 0,474683328 | 0,429 | 0,076355136 | 0,229065408 |
| 2,12 | 2,82 | 0,51653376 | 0,041 | 0,007509888 | 0,022529664 |
| 2,32 | 2,42 | 0,48508416 | 0,293 | 0,058731264 | 0,176193792 |
| 2,16666667 | 2,63566667 | 0,492100416 | 0,254333333 | 0,047532096 | 0,142596288 |

| | |
|------------|-------|
| Eficiencia | 0,928 |
|------------|-------|

| | | |
|--|-------------|----------------------|
| NaClO3 Alimentacion (ton/día) | 91,01976174 | Sin ClO2 como NaClO3 |
| NaClO3 Salida linea hacia evaporadores (ton/día) | 0,634697 | 0,655004 |
| NacClO3 ClO2 (ClO2+Cl) (ton/día) | 82,98231533 | 1,42230816 |
| Pérdidas sin contar ClO3 (ton/día) | | 2,07731216 |
| Clorato no reaccionado con eficiencia (ton/día) | 6,553422845 | |
| NaClO3 no rx. hacia Tk ClO2 como ClO3 mas acumulacion(ton/día) | 4,476110685 | |

Anexo 6. Resultados obtenidos de las mediciones en laboratorio.

| 45 Ton ClO ₂ | | | | |
|-------------------------|---|------------------------|------------------------|----------|
| Fecha de muestreo | 04-07-2019 | Hora de muestreo | 10:00:00 | |
| Número de muestra | Puntos de muestreo | ClO ₃ [g/l] | ClO ₂ [g/l] | Cl [g/l] |
| 1 | Salida torre de absorción de ClO ₂ | 0,25 | 9,8 | 0,13 |
| 2 | Salida Tk almacenamiento de ClO ₂ | 0,29 | 8,6 | 0,13 |
| 3 | Sulfato hacia evaporadores | 1,07 | - | 0,237 |
| 4 | Ácido a blanqueo desde Flex | - | - | - |

| 46 Ton ClO ₂ | | | | |
|-------------------------|---|------------------------|------------------------|----------|
| Fecha de muestreo | 08-07-2019 | Hora de muestreo | 10:00:00 | |
| Número de muestra | Puntos de muestreo | ClO ₃ [g/l] | ClO ₂ [g/l] | Cl [g/l] |
| 1 | Salida torre de absorción de ClO ₂ | 0,17 | 9,4 | 0,15 |
| 2 | Salida Tk almacenamiento de ClO ₂ | 0,27 | 9,0 | 0,15 |
| 3 | Sulfato hacia evaporadores | 2,46 | - | 0,235 |
| 4 | Ácido a blanqueo desde Flex | - | - | - |

| 48 Ton ClO ₂ | | | | |
|-------------------------|---|------------------------|------------------------|----------|
| Fecha de muestreo | 17-07-2019 | Hora de muestreo | 10:00:00 | |
| Número de muestra | Puntos de muestreo | ClO ₃ [g/l] | ClO ₂ [g/l] | Cl [g/l] |
| 1 | Salida torre de absorción de ClO ₂ | 0,27 | 9,6 | 0,11 |
| 2 | Salida Tk almacenamiento de ClO ₂ | 0,28 | 9,8 | 0,15 |
| 3 | Sulfato hacia evaporadores | 2,36 | - | 0,256 |
| 4 | Ácido a blanqueo desde Flex | - | - | - |

50 Ton ClO₂

| Fecha de muestreo | 09-07-2019 | Hora de muestreo | 10:00:00 | |
|-------------------|---|------------------------|------------------------|----------|
| Número de muestra | Puntos de muestreo | ClO ₃ [g/l] | ClO ₂ [g/l] | Cl [g/l] |
| 1 | Salida torre de absorción de ClO ₂ | 0,3 | 9,9 | 0,1 |
| 2 | Salida Tk almacenamiento de ClO ₂ | 0,27 | 10,1 | 0,11 |
| 3 | Sulfato hacia evaporadores | 1,84 | - | 0,289 |
| 4 | Ácido a blanqueo desde Flex | - | - | - |

51 Ton ClO₂

| Fecha de muestreo | 12-07-2018 | Hora de muestreo | 10:00:00 | |
|-------------------|---|------------------------|------------------------|----------|
| Número de muestra | Puntos de muestreo | ClO ₃ [g/l] | ClO ₂ [g/l] | Cl [g/l] |
| 1 | Salida torre de absorción de ClO ₂ | 0,23 | 9,4 | 0,12 |
| 2 | Salida Tk almacenamiento de ClO ₂ | 0,23 | 9,6 | 0,13 |
| 3 | Sulfato hacia evaporadores | 2,23 | - | 0,229 |
| 4 | Ácido a blanqueo desde Flex | - | - | - |

52 Ton ClO₂

| Fecha de muestreo | 19-07-2019 | Hora de muestreo | 10:00:00 | |
|-------------------|---|------------------------|------------------------|----------|
| Número de muestra | Puntos de muestreo | ClO ₃ [g/l] | ClO ₂ [g/l] | Cl [g/l] |
| 1 | Salida torre de absorción de ClO ₂ | 0,14 | 9,9 | 0,17 |
| 2 | Salida Tk almacenamiento de ClO ₂ | 0,22 | 10 | 0,16 |
| 3 | Sulfato hacia evaporadores | 1,52 | - | 0,369 |
| 4 | Ácido a blanqueo desde Flex | - | - | - |

53 Ton ClO₂

| Fecha de muestreo | 10-07-2019 | Hora de muestreo | 10:00:00 | |
|-------------------|---|------------------------|------------------------|----------|
| Número de muestra | Puntos de muestreo | ClO ₃ [g/l] | ClO ₂ [g/l] | Cl [g/l] |
| 1 | Salida torre de absorción de ClO ₂ | 0,31 | 10,7 | 0,13 |
| 2 | Salida Tk almacenamiento de ClO ₂ | 0,27 | 9,6 | 0,12 |
| 3 | Sulfato hacia evaporadores | 2,2 | - | 0,267 |
| 4 | Ácido a blanqueo desde Flex | - | - | - |

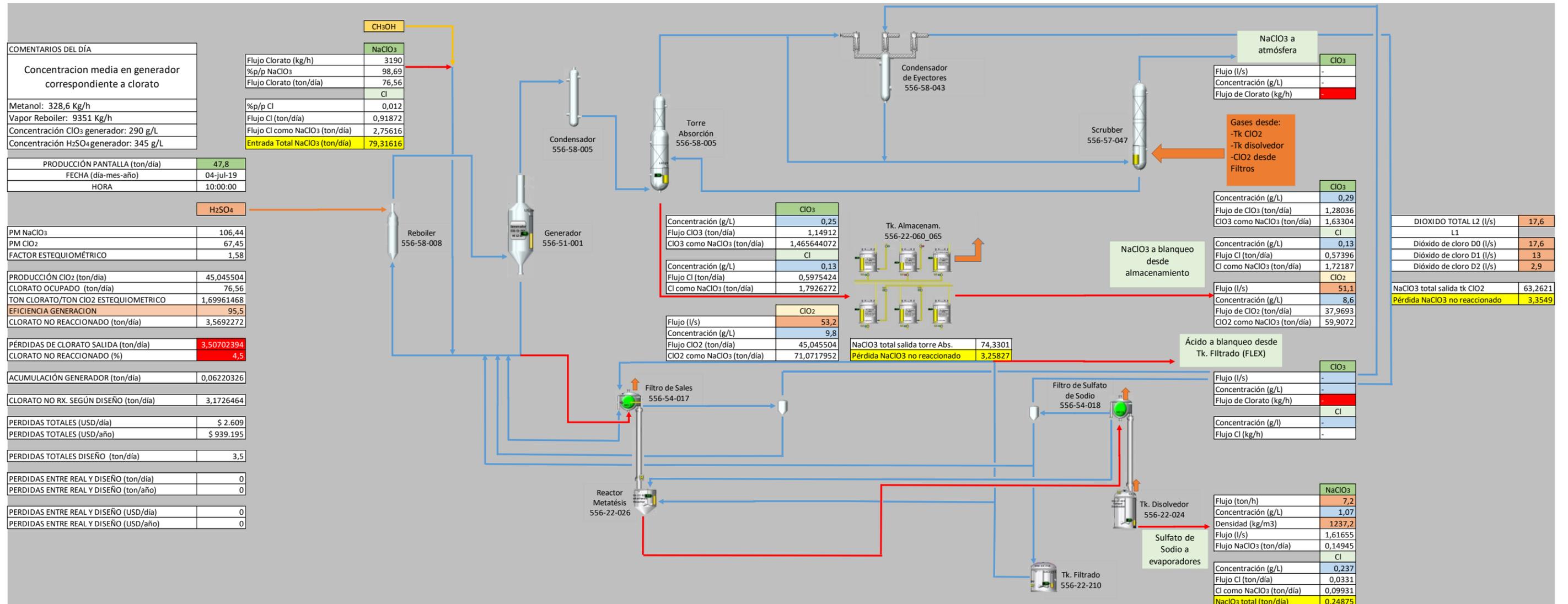
55 Ton ClO₂

| Fecha de muestreo | 18-07-2019 | Hora de muestreo | 10:00:00 | |
|-------------------|---|------------------------|------------------------|----------|
| Número de muestra | Puntos de muestreo | ClO ₃ [g/l] | ClO ₂ [g/l] | Cl [g/l] |
| 1 | Salida torre de absorción de ClO ₂ | 0,37 | 10,3 | 0,12 |
| 2 | Salida Tk almacenamiento de ClO ₂ | 0,37 | 10,1 | 0,14 |
| 3 | Sulfato hacia evaporadores | 1,88 | - | 0,118 |
| 4 | Ácido a blanqueo desde Flex | - | - | - |

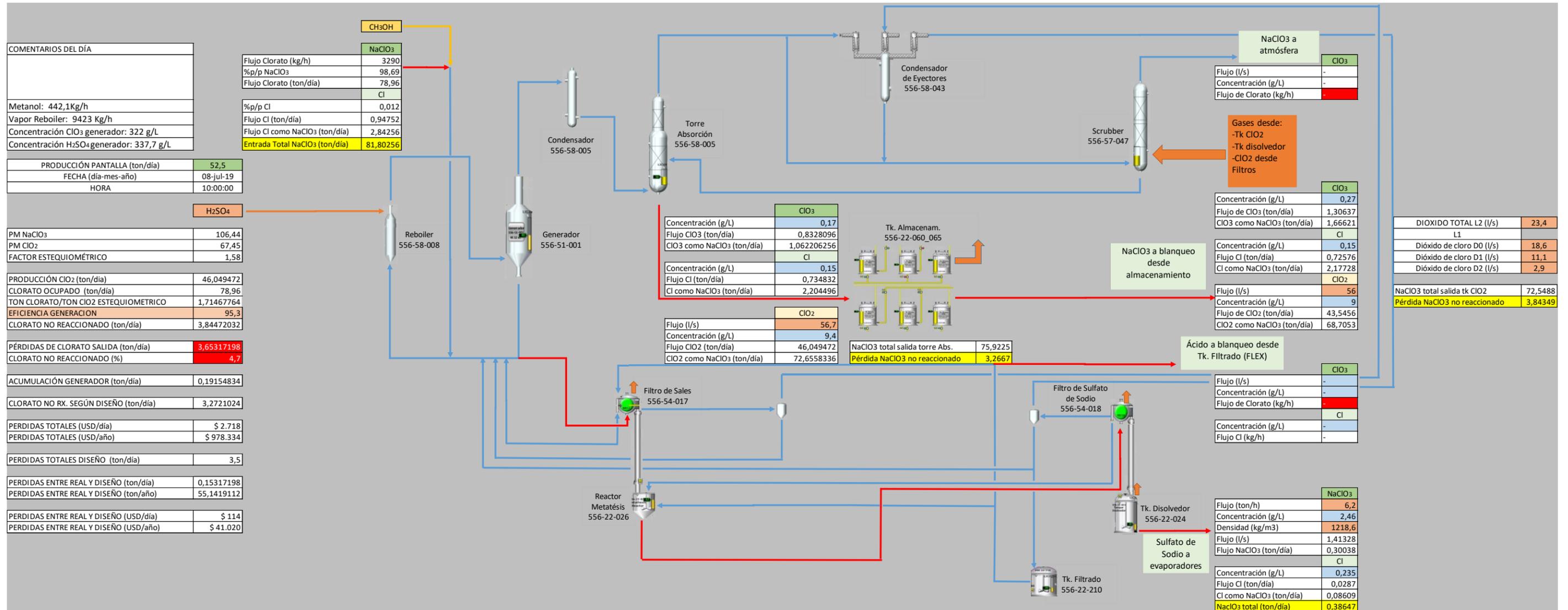
57 Ton ClO₂

| Fecha de muestreo | 19-07-2019 | Hora de muestreo | 8:25:00 | |
|-------------------|---|------------------------|------------------------|----------|
| Número de muestra | Puntos de muestreo | ClO ₃ [g/l] | ClO ₂ [g/l] | Cl [g/l] |
| 1 | Salida torre de absorción de ClO ₂ | 0,25 | 10,5 | 0,17 |
| 2 | Salida Tk almacenamiento de ClO ₂ | 0,24 | 10,6 | 0,16 |
| 3 | Sulfato hacia evaporadores | 1,52 | - | 0,369 |
| 4 | Ácido a blanqueo desde Flex | - | - | - |

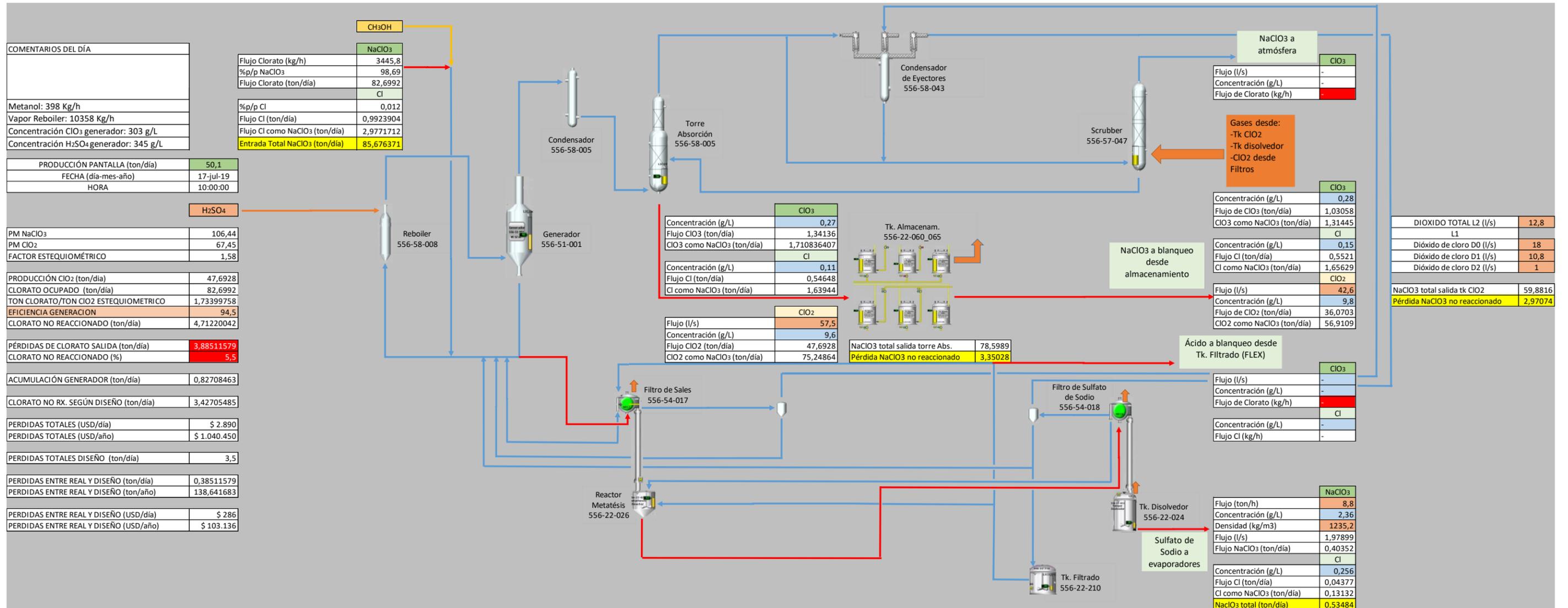
Anexo 7. Diagrama de balance de masa final para estudio de pérdidas de clorato de sodio para producción de 45 ton/día.



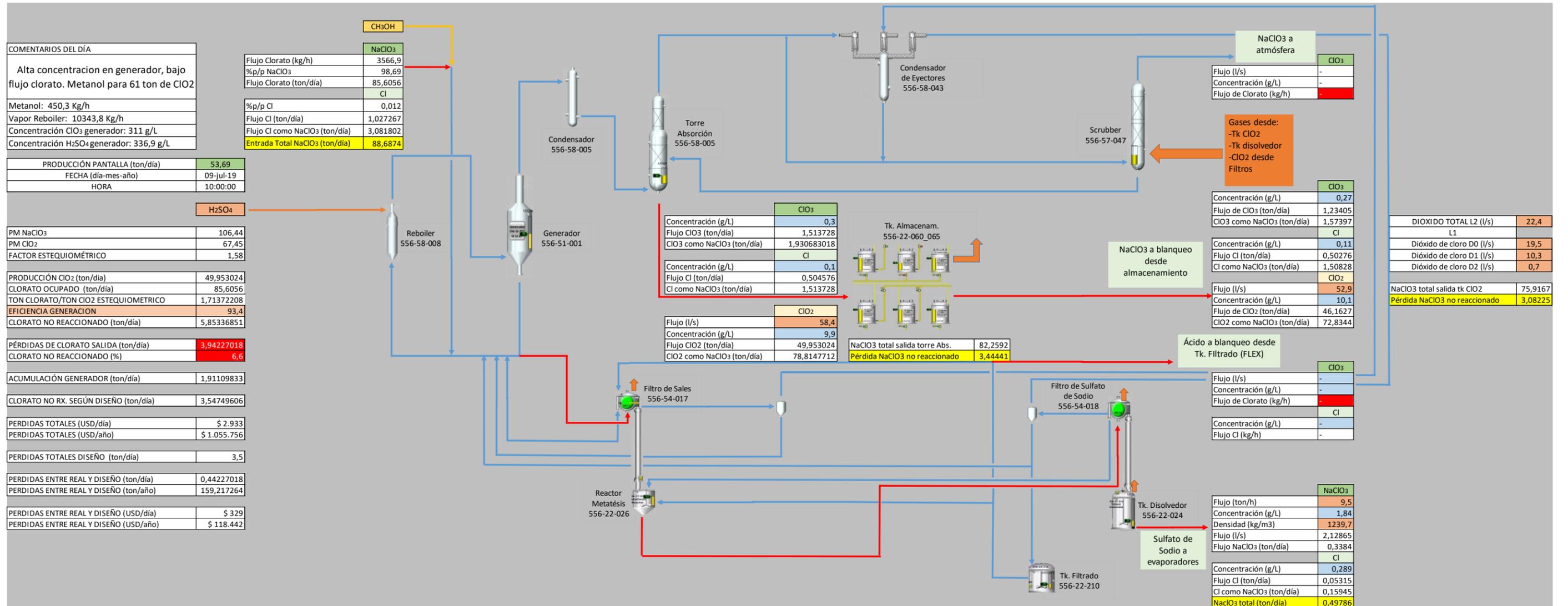
Anexo 8. Diagrama de balance de masa final para estudio de pérdidas de clorato de sodio para producción de 46 ton/día.



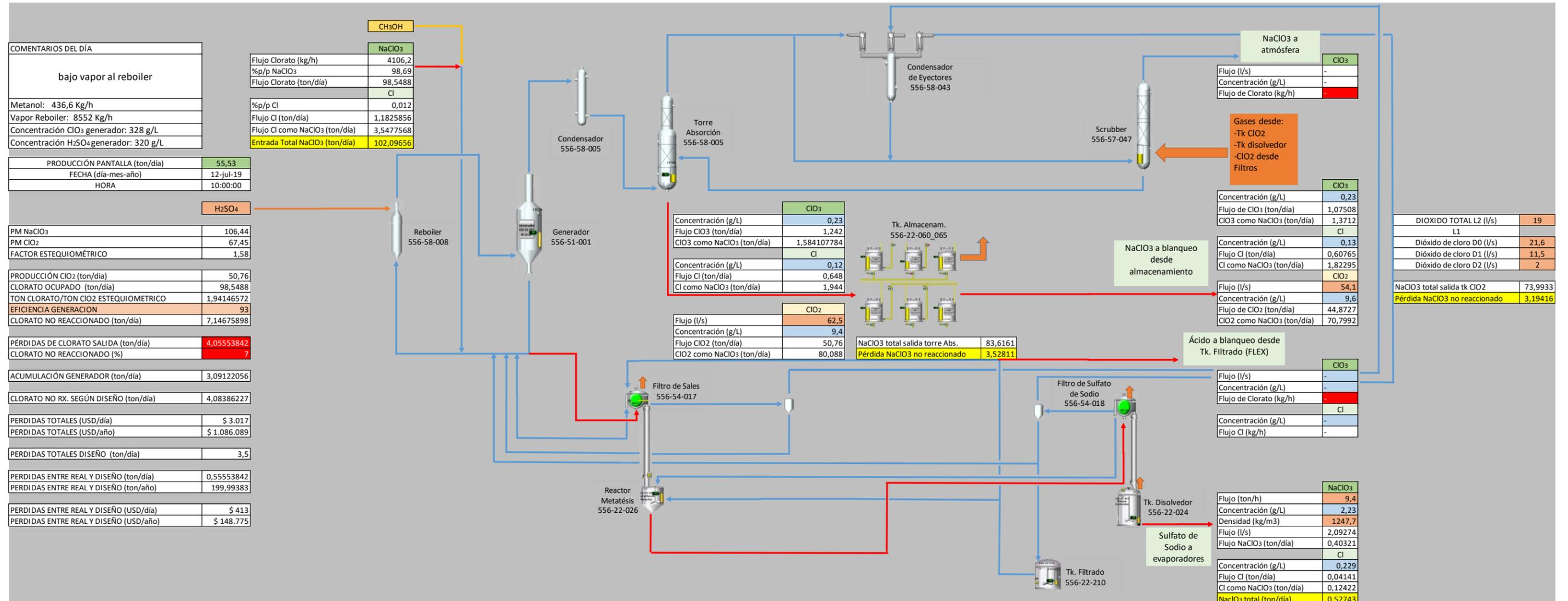
Anexo 9. Diagrama de balance de masa final para estudio de pérdidas de clorato de sodio para producción de 48 ton/día.



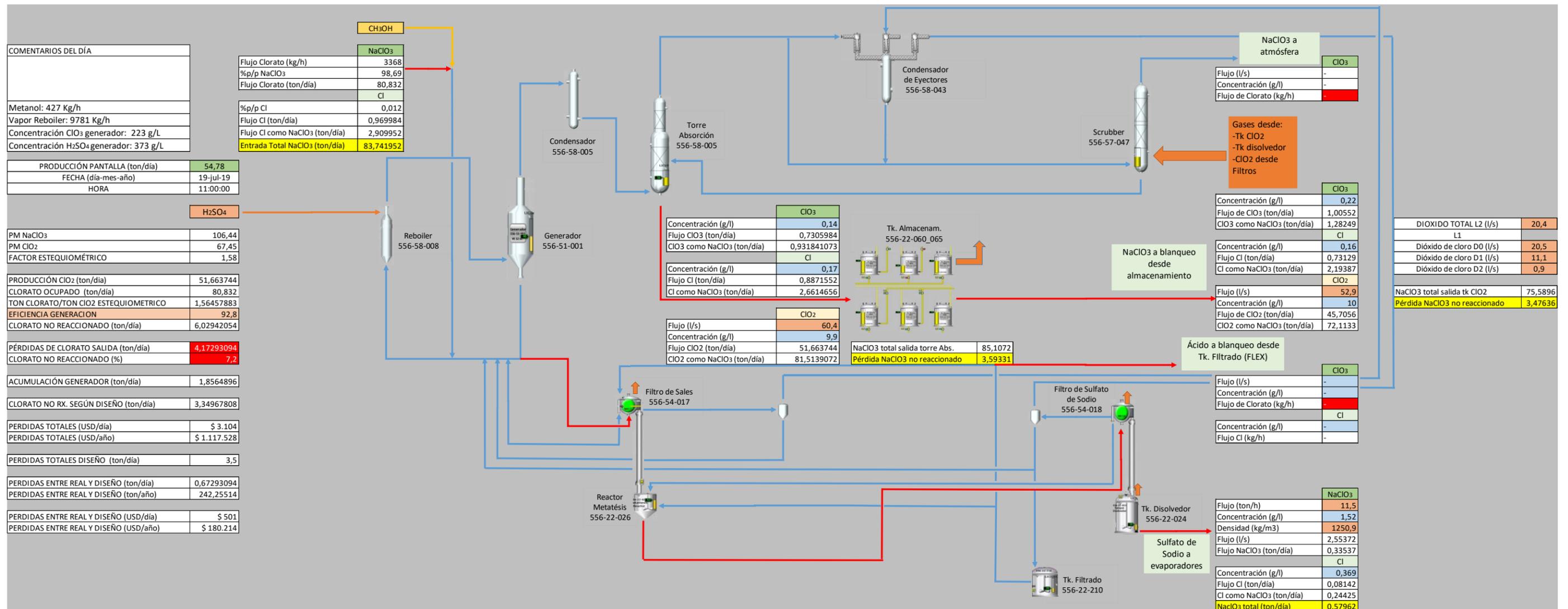
Anexo 10. Diagrama de balance de masa final para estudio de pérdidas de clorato de sodio para producción de 50 ton/día.



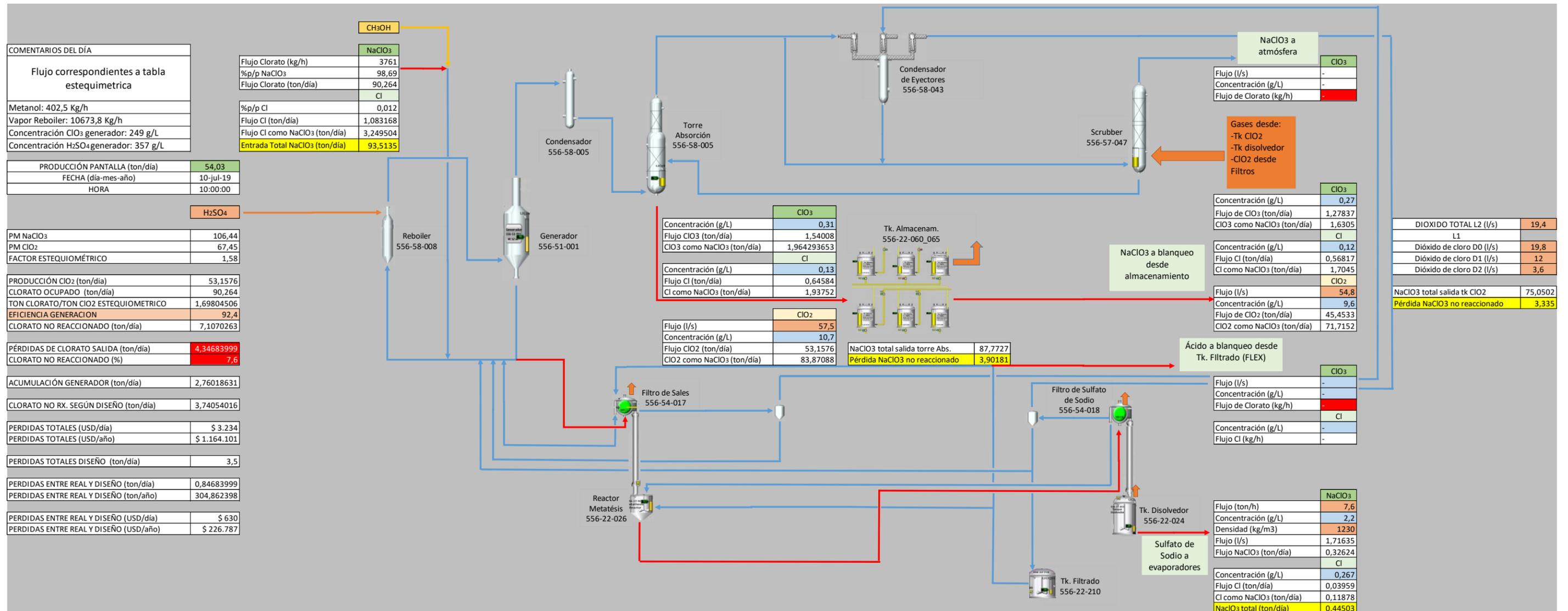
Anexo 11. Diagrama de balance de masa final para estudio de pérdidas de clorato de sodio para producción de 51 ton/día.



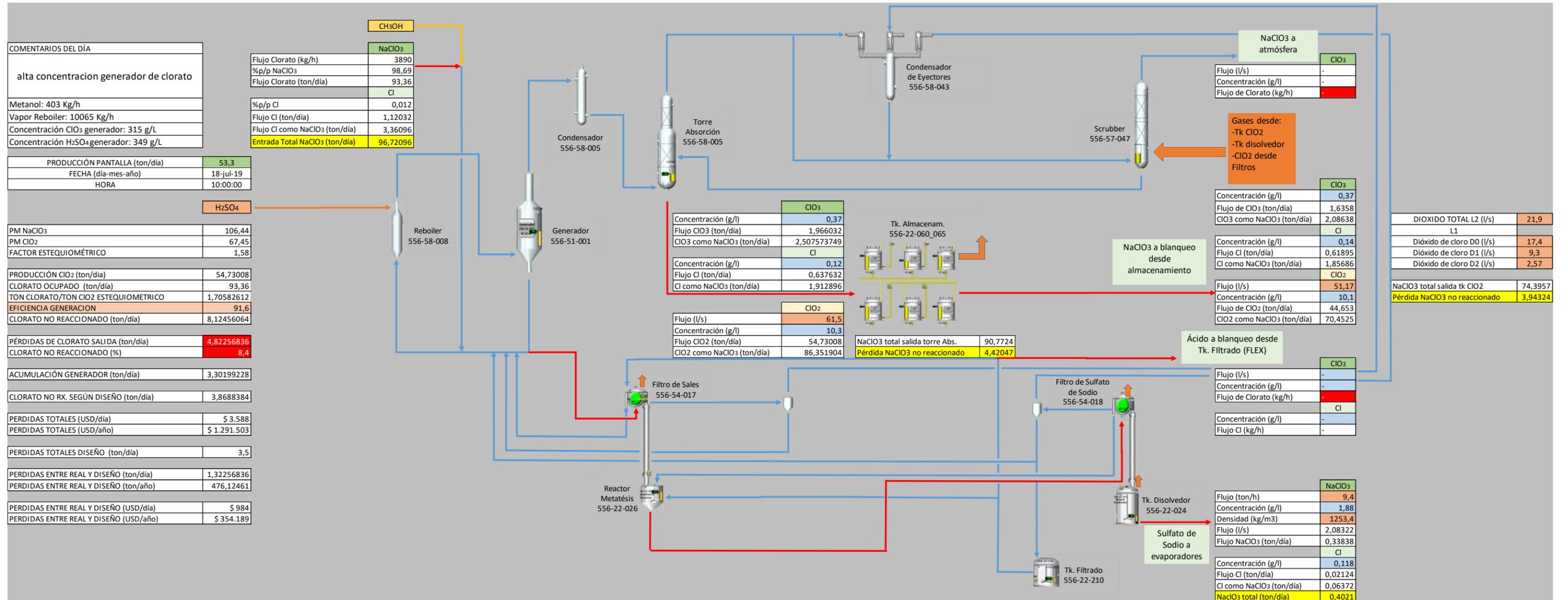
Anexo 12. Diagrama de balance de masa final para estudio de pérdidas de clorato de sodio para producción de 52 ton/día.



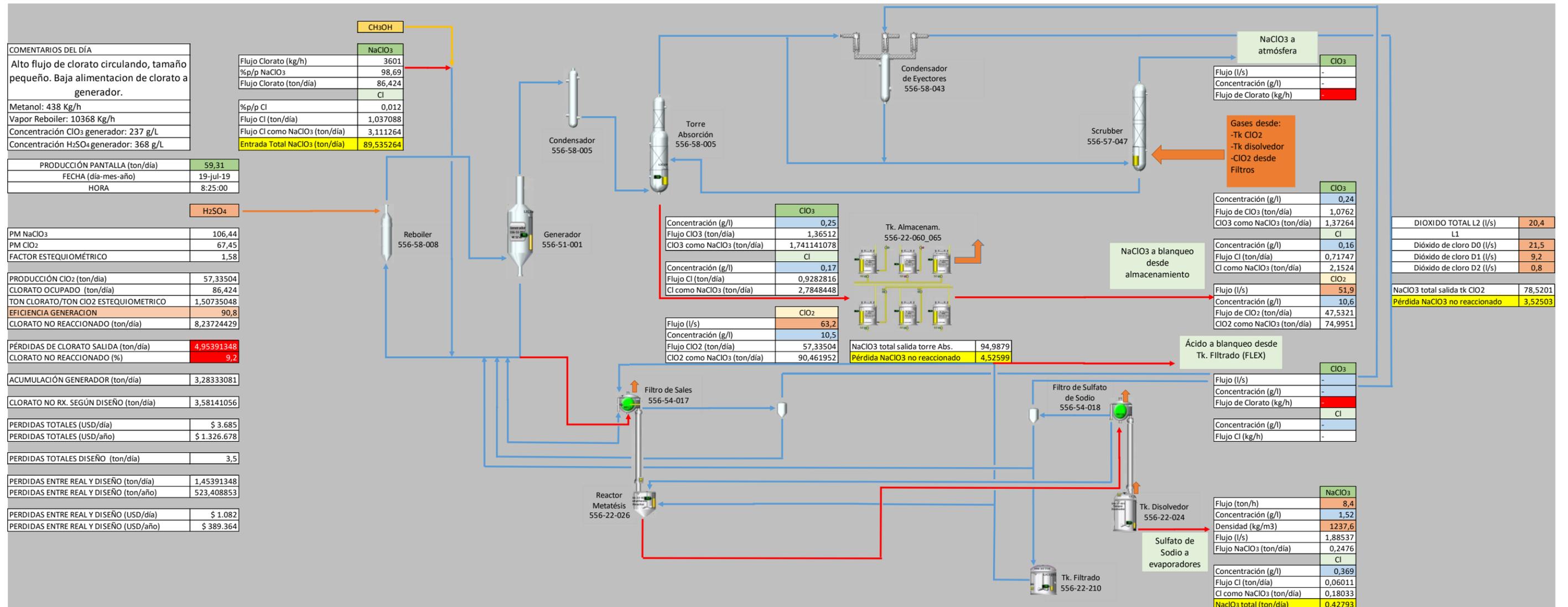
Anexo 13. Diagrama de balance de masa final para estudio de pérdidas de clorato de sodio para producción de 53 ton/día.



Anexo 14. Diagrama de balance de masa final para estudio de pérdidas de clorato de sodio para producción de 55 ton/día.



Anexo 15. Diagrama de balance de masa final para estudio de pérdidas de clorato de sodio para producción de 57 ton/día.



Anexo 16. Instructivo de laboratorio para medición de Clorato en solución de dióxido de cloro.

INSTRUCTIVO DE DETERMINACION DE CLORATO EN SOLUCIÓN DE DIOXIDO DE CLORO

INDICE

| | |
|-------------------------------------|---|
| 1. OBJETIVO..... | 1 |
| 2. ALCANCE..... | 1 |
| 3. DISTRIBUCION..... | 1 |
| 4. RESPONSABILIDADES..... | 1 |
| 5. DEFINICIONES..... | 2 |
| 6. REFERENCIAS..... | 3 |
| 7. DESCRIPCION DE LA ACTIVIDAD..... | 3 |
| 8. REGISTROS..... | 4 |
| 9. ANEXOS..... | 4 |
| 10. CONTROL DE REVISIONES..... | 5 |

1. OBJETIVO

Establecer la metodología para determinar la concentración de Clorato en solución de dióxido de cloro de planta generadora de dióxido de cloro en Celulosa Arauco y Constitución S.A., [REDACTED].

2. ALCANCE

Este instructivo es aplicable a la determinación de clorato en solución de dióxido de cloro de Planta de generación de Dióxido de Cloro y al personal que realiza el análisis.

3. DISTRIBUCION

| CARGO | CÓDIGO |
|------------------------------|----------|
| Jefe Laboratorio | JL-CC |
| Superintendente Fibra L2 | SI-SIFL2 |
| Jefe Op. Fibra L2 | IO-SIFL2 |
| Analista técnico Químico | A-TQ |
| Analista Laboratorio central | A-LAC |
| Analista Químico | A-QUI |

4. RESPONSABILIDADES

| Acciones a realizar | JL-CC | SI-SIFL2 | IO-SIFL2 | A-TQ | A-LAC | A-QUI |
|------------------------------|-------|----------|----------|------|-------|-------|
| Implementación del documento | | | | | | |
| Ejecución de la actividad | | | | | | |
| Verificación de la actividad | | | | | | |
| Capacitación del documento | | | | | | |
| Actualización del documento | | | | | | |

E: Responsabilidad de Ejecución C: Responsabilidad de Cooperación I: Derecho de información

Nota: Las letras minúsculas significan que responsabilidad está circunscrita a su ámbito de gestión solamente.

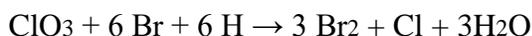
5. DEFINICIONES

En la generación de dióxido de cloro es necesaria una cuantificación de clorato en varios puntos del sistema. Este instructivo aplica a la solución de dióxido de cloro con mayor concentración referida a la salida de la torre de absorción y a la salida de los tanques de almacenamiento de dióxido de cloro hacia blanqueo.

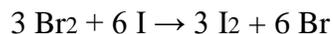
En este proceso existe la posibilidad de arrastre de clorato de sodio. Este instructivo entrega la metodología para cuantificar el clorato de arrastre en la solución de dióxido de cloro hacia blanqueo.

La concentración de clorato es determinada por titulación yodométrica con tiosulfato de sodio como titulante.

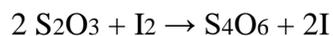
En solución acida, el clorato es reducido por bromuro y forma bromo y cloruro.



El bromo es reducido por el yoduro y forma yodo y bromuro.



La cantidad liberada de yodo es determinada por la titulación de tiosulfato.



6. REFERENCIAS

- Manual EKA NOBEL
- Matriz de Identificación, Evaluación y Gestión de Aspectos Ambientales (05.701.004.R1)

7. DESCRIPCION DE LA ACTIVIDAD

7.1 Equipos y Materiales

- **Materiales**
 - Matraz aforado de 100 ml
 - Probeta de 250 ml
 - Pipeta 5 ml

Titulador

- Equipo estándar de laboratorio

- **Reactivos**

- Bromuro de Sodio NaBr 10%
- Ácido Clorhídrico HCl Concentrado
- Yoduro de Potasio KI 10%
- Tiosulfato de Sodio Na₂S₂O₃ 0,1 M
- Almidón como indicador de titulación.

7.2 Aspectos relevantes de Seguridad y Medio Ambiente

Refiérase a las actividades de los laboratorios descritas en la matriz de identificación de peligros y evaluación de riesgos de la Superintendencia de Proceso y matriz de identificación, evaluación y gestión de aspectos ambientales.

7.3 Determinación de concentración de Clorato

- **Preparación de Muestra**

Tomar de 50 a 100 ml de muestra en vaso precipitado, y purgar aireando la muestra de 30 a 40 minutos con nitrógeno, hasta que esta quede completamente incolora.

Es importante que el procedimiento asociado a esta terminación se realice bajo campana de ventilación en todo momento.

- **Muestra**

- 1) Pipetear 5 ml de la solución purgada en Matraz Erlenmeyer de 500 ml.
- 2) Añadir 20 ml de Bromuro de Sodio al 10%.
- 3) Agregar 50 ml de Ácido Clorhídrico concentrado HCl
- 4) Sellar el matraz con un tapón, esperar 5 minutos, agitando de vez en cuando.
- 5) Agregar de 200-400 ml de agua desionizada, mezclar la solución.
- 6) Añadir 20 ml de Yoduro de Potasio al 10%.

7) Agitar la muestra y titular con Tiosulfato de Sodio 0,1 M (Usar almidón si es necesario para la determinación).

- **Cálculo y reporte**

$$NaClO_3 \left(\frac{g}{L} \right) = \frac{A \times C \times Mw}{V \times 6} = \frac{A \times 1.774}{V}$$

Dónde:

- **A** ml requerido para la titulación
- **6** Factor equimolar
- **C** Concentración de Na₂S₂O₃ (0,1 M)
- **M** Peso molecular del NaClO₃ (106,44)
- **V** Volumen de muestra en ml

LOQ (Limite de cuantificación): ≥ 0.05 g/L

Precisión: ± 10 %

7.4 Informe de resultados

Informar los resultados obtenidos en formulario de LAB 21 creado para estos registros.

8. REGISTROS

No aplica.

9. ANEXOS

No aplica.

10. CONTROL DE REVISIONES

| Versión | Fecha | Identificación de Modificación |
|---------|------------|---------------------------------|
| 0.0 | 02-08-2019 | 1. Oficialización del Documento |

Anexo 17. Fotografías de toma de muestra en terreno en planta generadora de dióxido de cloro.



Imagen 1. Toma de muestra en descarga de TK disolvedor.



Imagen 2. Toma de muestra salida torre de absorción y salida TK almacenamiento de dióxido de cloro.

Anexo 18. Determinación clorato de sodio en laboratorio.

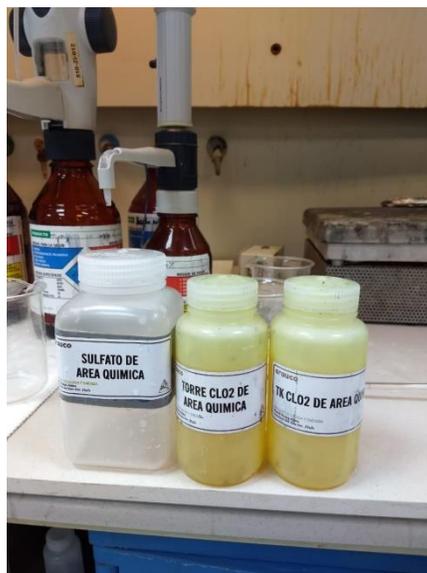


Imagen 3. Fotografía de frascos de muestreo.



Imagen 4. Reactivos utilizados en laboratorio.



Imagen 5. Purgas de dióxido de cloro en análisis de laboratorio.