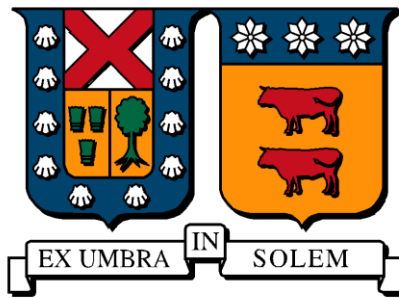


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

SEDE CONCEPCIÓN



“PROPUESTA DE MEJORA EN PROCESO DE PLANTA DESALADORA PARA UNA OPERACIÓN MINERA”

Proyecto de Titulación para optar al Título
de INGENIERO DE EJECUCIÓN EN
GESTIÓN DE LA CALIDAD

Alumno:

Patricio Gonzalo Cárdenas Aliaga

Profesor Guía:

Juan Pablo Inostroza Saldías



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE
MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): @ Memoria o trabajo de título 0 Tesis de Postgrado

Título del trabajo: PROPUESTA DE MEJORA EN PROCESO DE PLANTA DESALADORA PARA LINA OPERACIÓN MINERA

Nombre del candidato(a): PATRICIO GONZALO CÁRDENAS ALIAGA

Carrera / Grado: INGENIERÍA DE EJECUCIÓN EN GESTIÓN DE LA CALIDAD

Campus: CONCEPCIÓN Departamento: DE QUÍMICA Y MEDIO AMBIENTE

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, JUAN PABLO INOSTROZA SALDÍAS, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente DEJO CONSTANCIA que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

6 El trabajo **NO** contiene información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

0 El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por (marcar una opción):

0 6 meses 0 12 meses 0 2 años 0 3 años 0 5 años 0 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 19/07/26

Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 07/07/2026

Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de lo entrego en portal PRISMA de Biblioteca USD.

AGRADECIMIENTOS

Han pasado cinco años desde que comencé este desafío y al mirar hacia atrás puedo reflexionar y dar gracias a Dios por que siempre me mantuvo fuerte y con esperanza. Sin duda, durante este proceso viví uno de los momentos más angustiantes de mi vida y que finalmente me impulso a seguir adelante, te quiero agradecer hija por seguir en nuestras vidas, porque siempre diste todo y más por recuperarte, te amo.

Quiero agradecer a mi hermano Nachito por motivarme a tomar este reto y estar ahí siempre que lo he necesitado, gracias por tu apoyo incondicional.

Agradecer también a todas las personas que trabajan en la universidad y que hacen posible que trabajadores como yo tengan la oportunidad obtener un título profesional, gracias por la comprensión, paciencia y apoyo.

Gracias, profesor Juan Pablo por su ayuda y dedicación durante este último año, ha sido fundamental para poder finalizar este proceso tan importante en mi vida.

Finalmente quiero mencionar a mis amados hijos Belén, Agustina y Mauro, porque son mi motivación permanente para continuar adelante con todos mis proyectos.

RESUMEN

El presente trabajo de título enmarca una problemática común dentro de un proceso productivo. Disminuir, eliminar y controlar los desperdicios ya sea de insumos o de tiempo es un desafío que toda empresa tiene durante todo su período de existencia. Sin duda, el impacto económico que puede lograr alcanzar esta mitigación es significativa al momento de disminuir los costos productivos.

Mediante la aplicación de herramientas de calidad, bajo la metodología PDCA con un enfoque en solución de problemas, se analizará el estado actual de un proceso, con el fin de elaborar e implementar un plan de mejoramiento de un tratamiento productivo de una planta desaladora, perteneciente a una operación minera, que utiliza la osmosis inversa como tecnología para llevar a cabo este tratamiento fisicoquímico. Esto enfocado en disminuir los costos de producción generado por los desperdicios provocados por la ejecución de acciones correctivas durante cortos períodos de tiempo.

Contar con un agua de calidad al momento de realizar el tratamiento de osmosis inversa, es fundamental para obtener un proceso eficiente y controlado, de manera contraria, una calidad deficiente puede provocar un alto costo en el proceso, además de condicionar la disponibilidad de equipos ante una demanda constante de agua por parte de otros procesos productivos o clientes.

INDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	JUSTIFICACIÓN DEL TEMA.....	2
1.2	OBJETIVOS.....	2
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.4	ALCANCE	2
2	METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	3
2.1.1	Levantamiento del Proceso	3
2.1.2	Evaluación del estado actual del proceso.....	3
2.1.3	Aplicación del ciclo PDCA	3
2.1.4	Validación de Resultados.....	4
2.2	MARCO TEÓRICO	5
2.3	CICLO DE DEMING O PDCA	5
2.3.1	Propósito del ciclo PDCA	5
2.3.2	Etapas del ciclo PDCA.....	5
2.4	HERRAMIENTAS DE CALIDAD.....	7
2.4.1	Diagrama de flujo.....	7
2.4.2	Diagrama de Pareto	7
2.4.3	Diagrama de dispersión.....	8
2.4.4	Diagrama de causa y efecto	8
2.4.5	Graficas de control	9
2.5	ESTADO DEL ARTE.....	10
2.5.1	Plantas desaladoras en la Industria Minera.....	10
2.5.2	Descripción del proceso de Osmosis Inversa.....	12
2.5.3	Problemas más comunes en las Plantas de Osmosis Inversa.....	13
3	ANTECEDENTES GENERALES.....	15
3.1	Descripción de la Empresa.....	15
3.1.1	Excelencia Operacional.....	15
3.1.2	Planta Desaladora.....	15
3.1.3	Descripción del Proceso	15
4	DESARROLLO.....	19
4.1	Planteamiento del Problema.....	19
4.1.1	Evaluación del estado actual del proceso	19
4.1.2	Consumos y costos de Insumos Químicos	20
4.1.3	Disponibilidad de Equipos.....	21
4.1.4	Factores de Impacto.....	23

4.2	Aplicación PDCA.....	24
4.2.1	Plan.....	24
4.2.2	Do (hacer)	41
4.2.3	Check (verificar)	42
4.2.4	Act (actuar)	43
4.2.5	Do (hacer)	44
4.2.6	Check (verificar)	46
4.2.7	Act (actuar)	47
4.3	Resultados Generales	47
4.4	Validación de Resultados	48
4.4.1	Introducción.....	48
4.4.2	Metodología de Validación.....	48
4.4.3	Indicadores de Desempeño:.....	48
4.4.4	Resultados de la Validación	49
4.4.5	Análisis de Resultados	50
4.5	Limitaciones del Estudio y Trabajos Futuros.....	50
4.5.1	Conclusiones y Recomendaciones.....	50
4.5.2	Introducción.....	52
4.5.3	Limitaciones del Estudio	52
4.5.4	Posibles Trabajos Futuros	53
5	BIBLIOGRAFÍA	55
6	ANEXOS	56

INDICE DE FIGURAS

figura 2.1 Plan de trabajo. Fuente: Elaboración propia..... 3

figura 2.2 Diagrama de flujo. Fuente: support.microsoft.com 7

figura 2.3 Diagrama de Pareto. Fuente: support.microsoft.com..... 7

figura 2.4 Diagrama de dispersión. Fuente: Universidad de Valencia uv.es 8

figura 2.5 Diagrama de causa y efecto. Fuente: wordpress.com..... 8

figura 2.6 Grafico de control. Fuente: support.minitab.com..... 9

figura 4.1 Causas de detención de módulos. Fuentes: Elaboración propia 22

figura 4.2 Factores operacionales de detención. Fuente: Elaboración propia 23

figura 4.3 Diagrama de Proceso osmosis inversa. Fuente: Elaboración propia 26

figura 4.4 Grafico de control medición de SDI. Fuente: Elaboración propia..... 28

figura 4.5 Grafico de control capacidad de retención PF. Fuente: Elaboración propia 29

figura 4.6 Grafico de control medición de TSS. Fuente: Elaboración propia..... 30

figura 4.7 Correlación de SDI y porcentaje de retención PF. Fuente: Elaboración propia 31

figura 4.8 Correlación de TSS y porcentaje de retención PF. Fuente: Elaboración propia 32

figura 4.9 Grafico de control porcentaje de retención. Fuente: Elaboración propia 42

figura 4.10 Grafico de control porcentaje de retención mejora. Fuente: Elaboración propia 46

figura 4.11 Mezclador estático. Fuente: primix.com/products 50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1 Consumo de químicos en lavados de osmosis inversa. fuente: elaboración propia	20
Tabla 4.2 Costos asociados a lavados de osmosis inversa. fuente: elaboración propia.	21
Tabla 4.3 Causas de no disponibilidad de módulos de osmosis inversa. Fuente: elaboración propia.	21
Tabla 4.4 Causas de no disponibilidad por motivos operacionales. Fuente: elaboración propia.	22
Tabla 4.5 lluvia de ideas. Fuente: Elaboración propia.	33
Tabla 4.6 Evaluación de causas. Fuente: Elaboración Propia.	34
Tabla 4.7 Categorización de ejecución. Fuente: Elaboración propia.....	35
Tabla 4.8 Resultado de aforo de bombas dosificadoras. Fuente: Elaboración Propia	35
Tabla 4.9 Rango de caudales de operación filtros. Fuente: Ficha Técnica de Filtros TX/acero.....	36
Tabla 4.10 Identificación y Dosis para Ensayo de Jarras. Fuente: Elaboración Propia.....	37
Tabla 4.11 Selección de Coagulante y Dosis. Fuente: Elaboración Propia.....	37
Tabla 4.12 Ensayos seleccionados para dosificación de Coagulante. Fuente: Elaboración Propia.....	37
Tabla 4.13 Ensayo extra para selección de dosificación de coagulante. Fuente: Elaboración Propia.....	38
Tabla 4.14 Diferencia de resultados de SDI y TSS. Fuente: Elaboración Propia...	49
Tabla 4.15 Costos asociados a Lavados antes de implementación de mejoras. Fuente: Elaboración Propia.	49
Tabla 4.16 Costos asociados a Lavados posterior a implementación de mejoras. Fuente: Elaboración propia.....	49

SIGLA Y SIMBOLOGÍA

SIGLA

PDCA	: Plan, Do, Check, Act.
COCHILCO	: Comisión Chilena del Cobre.
Cu	: Cobre.
NaClO	: Hipoclorito de Sodio.
NTU	: Nephelometric Turbidity Unit (Unidad Nefelométrica de Turbidez).
TSS	: Solidos Totales en Suspensión.
ORP	: Oxidation Reduction Potencial (Potencial de Oxidación y Reducción).
SDI	: Silt Density Index (Índice de Densidad de Ensuciamiento).
BAP	: Bomba de Alta Presión.
OI	: Osmosis Inversa.
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales).
PF	: Pre Filtrado.
FeCl ₃	: Cloruro Férrico.
DCS	: Data Control System.
KPI	: Key Performance Indicator (Indicador Clave de Rendimiento).
USD	: dólar estadounidense.
RILES	: Residuos Líquidos Industriales.

SIMBOLOGÍA

μS	: Micro Siemens.
mg/l	: Milígramos por Litro.
mV	: Milivoltio.
kg	: Kilogramo.
h	: Hora.
m³/h	: Metro Cúbico por Hora.
ppm	: Partes Por Millón.
ml	: Mililitro.
s	: Segundo.
g/kg	: Gramos por Kilogramos.
US\$	: Dólar estadounidense.

1 **INTRODUCCIÓN**

Toda empresa aspira a un futuro sostenible y de permanencia en el mercado, para ello ser competitivo es un aspecto crítico por considerar y para lograrlo se deben realizar acciones que permitan alcanzar este nivel y que, además, sea progresivo a través del tiempo. ¿Pero, cómo podemos saber si nuestra empresa es competitiva?

Una manera de medir la competitividad hace referencia al análisis de los procesos y la productividad.

Para ello, se debe ahondar en aspectos como el grado de alineación de los procesos con la estrategia marcada por la compañía, analizando si la atención y esfuerzos están enfocados en la parte más estratégica del negocio, comprobando si la tecnología y recursos que disponemos se están aplicando correctamente, con el fin de optimizar los procesos operativos. La obtención del éxito en la optimización de estos dependerá en gran medida del grado de compromiso de cada integrante en los diferentes niveles involucrados, infundiendo la importancia y beneficios de contar procesos estables para un eficiente control en los costos de operación.

Hoy en día las compañías mineras enfrentan grandes desafíos que involucran cambios importantes en el uso de recursos utilizados para la ejecución de sus procesos. Cambios de escenario influidos tanto por factores externos como internos que pueden amenazar el desarrollo de las operaciones en un corto y mediano plazo debido a los altos costos de inversión que estos demandan.

La escasez del recurso hídrico, las leyes de los minerales muy bajas y decreciendo, yacimientos en vías de agotarse, aumento desproporcionado de la carga tributaria, incertidumbre del marco regulatorio, incertidumbre en las certezas jurídicas tributarias, la inflación, la crisis climática origina que los procesos mineros sean descarbonizados, la dureza de la roca cada vez más alta lo que provoca el encarecimiento de los proyectos.

Basado en estos riesgos, procesar un mineral de baja ley es un desafío que la mayoría de las compañías mineras deberán asumir dentro de los próximos 10 años. Sin embargo, el desarrollo del presente Proyecto de Título se plantea en el análisis de un proceso que pertenece a una compañía minera pionera en el procesamiento de mineral de baja ley, lo que implica fomentar constantemente entre sus colaboradores la optimización en el uso de materiales e insumos, reducir el desperdicio y prolongar la vida útil de los equipos y así lograr la excelencia operacional y competitividad en el mercado.

El presente trabajo pretende recoger y aplicar la metodología sistemática del ciclo PDCA en el proceso de una planta desaladora perteneciente a una operación de gran minería, permitiendo enfocar los esfuerzos en las etapas de acuerdo con el nivel de criticidad y prioridad de ejecución.

1.1 JUSTIFICACIÓN DEL TEMA

La aplicación de la metodología PDCA enfocada en solución de problemas posibilitará identificar las debilidades del proceso, proporcionando una mirada integral de sus etapas críticas que permitan desarrollar estrategias para mitigar el impacto negativo en los distintos escenarios que enfrenta el proceso y, además, profundizar los conocimientos teóricos referentes al tratamiento de desalinización de aguas oceánicas para uso industrial.

1.2 OBJETIVOS

El objetivo general de este proyecto de título es elaborar una propuesta de mejora para una planta desaladora perteneciente a una operación de gran minería, mediante la aplicación de la metodología PDCA, que permita reducir en un 50% los costos de operación causados por el desperdicio de insumos químicos, en un período de 12 meses.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para lograr el éxito de este proyecto, se definen los siguientes objetivos específicos:

- Realizar un diagnóstico del estado actual del proceso en un plazo de 30 días, que permita identificar al menos dos etapas críticas que contribuyan al desperdicio de insumos.
- Detectar y priorizar las oportunidades de mejora para el proceso desalación, en función de su impacto y disponibilidad de recursos, enfatizando en las dos mejoras más viables y de corto plazo, en un período de 30 días.
- Elaborar un plan de mejora específico que incluya la implementación de al menos dos acciones correctivas justificadas en el ciclo PDCA, con un cronograma detallado y métricas de seguimiento, en un plazo de 30 días.

1.4 ALCANCE

El alcance del proyecto contempla el análisis del proceso, dentro de un período de 1 año, mediante datos de control del proceso y costos, correspondiente a la operación y mantención de planta desalinizadora de agua de mar, perteneciente a planta concentradora de minerales.

2 **METODOLOGÍA DE TRABAJO**

El desarrollo de este proyecto se divide en cuatro etapas principales, en las cuales se definen las actividades que permitirán la siguiente secuencia de actividades

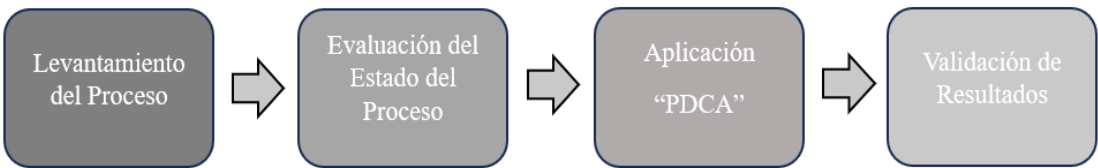


figura 2.1 Plan de trabajo. Fuente: Elaboración propia

2.1.1 Levantamiento del Proceso

En esta etapa está contemplada la recolección de datos correspondientes a un año de operación proporcionados por el área de aguas. En un período de 30 días, serán clasificados según su origen, para el caso, se dividen en:

- Datos de control de proceso, donde se consideran variables cuantitativas de control en las tres etapas del proceso de desalación.
- Datos de mantención programadas e imprevistas, están relacionados al registro de horas de no disponibilidad de los equipos del proceso por motivos de mantención y operacionales.
- Datos de costos de mantención operacional, contemplan los gastos variables correspondientes al consumo de insumos químicos utilizados para recuperar la eficiencia de los módulos de osmosis inversa.

2.1.2 Evaluación del estado actual del proceso

En este punto se realizará el análisis mediante el manejo de los datos reunidos, con el objetivo de obtener un diagnóstico del estado actual del proceso en contraste a un estado óptimo de operación, con el fin de identificar y definir los puntos críticos del proceso que permitan generar objetivos medibles para la aplicación de la metodología PDCA en la siguiente etapa del proyecto.

2.1.3 Aplicación del ciclo PDCA

Una vez identificadas las debilidades en el proceso de osmosis inversa, se inicia la aplicación de la metodología PDCA, cuyo objetivo es determinar el origen del problema

con un análisis más específico y en profundidad de los puntos críticos del proceso, para facilitar la identificación e implementación de las oportunidades de mejoras, de acuerdo con el impacto esperado en el área.

2.1.4 Validación de Resultados

La validación de resultados es una etapa crítica en la metodología PDCA ya que permite verificar la efectividad de las mejoras implementadas y asegura que los objetivos del proyecto se han alcanzado. Esta sección describe los métodos utilizados para validar los resultados obtenidos y los indicadores clave de desempeño que se han evaluado.

2.2 MARCO TEÓRICO

En el siguiente capítulo se detallan los rasgos y características de la metodología PDCA y herramientas de gestión de calidad que sustentan el desarrollo de este proyecto de título, con apoyo de información recopilada de libros y exponentes del tema, sumado a los conocimientos adquiridos durante el proceso de mi preparación profesional. Igualmente, se realiza un estudio sobre el estado del arte referente a los procesos y desarrollo de plantas desaladoras para aguas de uso industriales.

2.3 CICLO DE DEMING O PDCA

En el año 1939 el Dr. Walter Shewhart (padre de los gráficos de control) despliega la base del ciclo PDCA pensado en el control estadístico de las líneas productivas. Pero fue William E. Deming, discípulo de W. Shewhart, quien, a mediados del siglo pasado en Japón, posterior a la Segunda Guerra Mundial, enseñó a empresarios y académicos japoneses, una metodología enfocada en la manufacturación de productos, donde era necesario contar con procesos que optimizaran el uso de la escasa materia prima con la que se disponía en esos momentos. Presentó la “Rueda del Control de Calidad” (Wheel of Quality Control) que, con el tiempo fue desarrollando una serie de cambios en su estructura, pero siempre manteniendo su base en la importancia y responsabilidad por la calidad.

2.3.1 Propósito del ciclo PDCA

En un principio, el ciclo PDCA se relacionaba directamente con las líneas productivas, en los procesos de manufacturación, pero, hoy en día, su correcta implementación permite realizar cambios o mejoras de manera transversal en los distintos niveles dentro de una organización, incluso puede ser aplicado en nuestra vida cotidiana, asegurando resultados que impactan de manera positiva en distintos escenarios que requieran un aumento en la productividad.

2.3.2 Etapas del ciclo PDCA

Las siglas PDCA refieren a las palabras en inglés “Plan”, “Do”, “Check”, “Act” que en español significan “Planificar”, “Ejecutar”, “Verificar” y “Actuar”. El concepto se basa en ejecutar cada etapa de acuerdo con las necesidades propia de cada organización y una vez finalizada la aplicación, se debe volver a la primera y repetir el ciclo. Por lo tanto, las actividades son revaluadas periódicamente con el fin de incorporar nuevas mejoras.

A continuación, se detalla cada una de estas etapas, mencionando las actividades que se deben ejecutar para obtener los resultados esperados.

- **Plan**, en esta primera etapa del ciclo se define la situación actual del proceso, lo que implica analizar y entender el problema u oportunidad para plantear los objetivos, además, se debe definir la estrategia y secuencia para cumplirlos. Dentro del análisis es de suma importancia lograr identificar la causa raíz, de forma que se asegure que los objetivos estén claramente definidos y enfocados, con uno o más indicadores que nos permitan medir la evolución de la implantación.

- **Do**, Una vez realizado el análisis y establecido el plan de acción llega el tiempo de la implementación. Esta etapa requiere de un alto grado de compromiso, ya que el equipo encargado de la ejecución del plan de acción debe seguir de manera disciplinada todo lo planificado, considerando los parámetros establecidos en cuanto a tiempo, recursos y riesgos, y a su vez según el grado de complejidad de la actividad se debe registrar cualquier desviación que altere el curso de esta planificación.

- **Check**, La verificación es la etapa donde se debe medir y contrastar los resultados de la implementación con las expectativas del proyecto.

Es importante definir en la etapa de planificación el alcance de la medición y a su vez, plantear las métricas y métodos que serán usados en el desarrollo del proceso, ya que la información clara facilitara la comprensión y captura de datos que son requeridos para obtener el primer diagnóstico en la implementación de la mejora.

- **Act**, Una vez identificadas la desviaciones resultantes de la comparación de lo obtenido versus lo esperado llega el tiempo de corregir o implementar las oportunidades de mejora que se puedan obtener a lo largo del proyecto. Según los artículos relacionados con la implementación de la metodología PDCA, se espera que, al llegar a esta etapa, si todo resultara de acuerdo con lo esperado y planificado no se debería realizar actividades de corrección, pero en lo práctico siempre hay algo que mejorar.

Además, es necesario mencionar que el éxito de los resultados en la aplicación de las metodologías de gestión en la mejora continua dependerá en gran medida de la comprensión y del enfoque con el cual será aplicado.

2.4 HERRAMIENTAS DE CALIDAD

Los métodos de gestión obedecen a una serie de tareas que se deben realizar de manera sistemática dentro de un proceso u organización. Sin embargo, estas metodologías de gestión necesitan de herramientas que, aplicadas en conjunto sobre los procesos, posibilitaran el análisis, además de proporcionar una visión clara en la toma de decisiones para mejora de este mismo.

2.4.1 Diagrama de flujo

El diagrama de flujo representa visualmente la secuencia de actividades realizadas en un proceso para la obtención de un producto o entrega de un servicio. Además de facilitar su comprensión puede ayudar a la detección de oportunidades y amenazas que se presenten tanto interna como externamente.

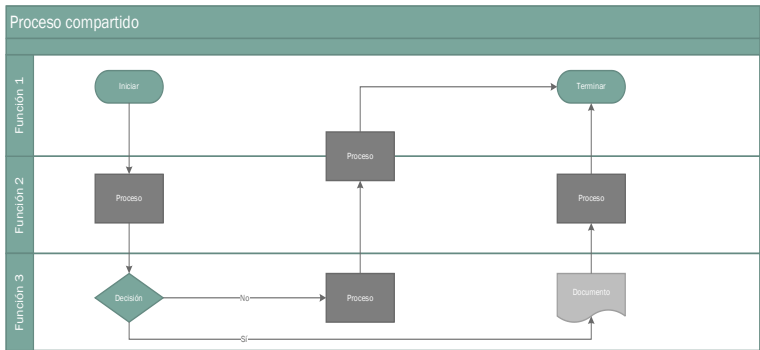


figura 2.2 Diagrama de flujo. Fuente: support.microsoft.com

2.4.2 Diagrama de Pareto

Esta herramienta consiste en un gráfico derivado de frecuencias y porcentajes acumulados de eventos que son enmarcados en un área o proceso, y a su vez, ordenados de mayor a menor frecuencia, brindarán a la línea de mando las prioridades a la hora de tomar decisiones para la implementar proyectos de mejoras.

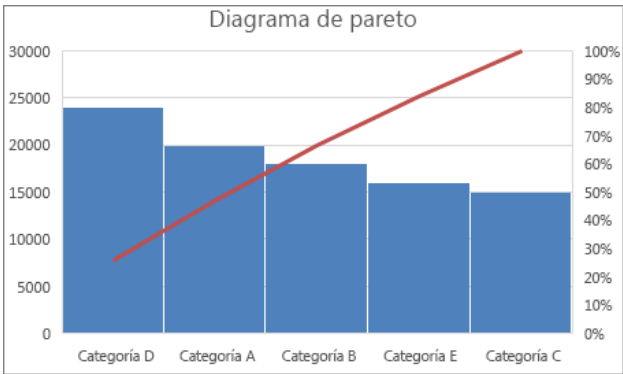


figura 2.3 Diagrama de Pareto. Fuente: support.microsoft.com

2.4.3 Diagrama de dispersión

Esta herramienta se basa en graficar una serie de datos provenientes de variables, que se podrían clasificar en independiente (x) y dependiente (y). Desde esta grafica podemos obtener la relación existente entre dichas variables, y cómo influye la variación de alguna de estas sobre la otra.

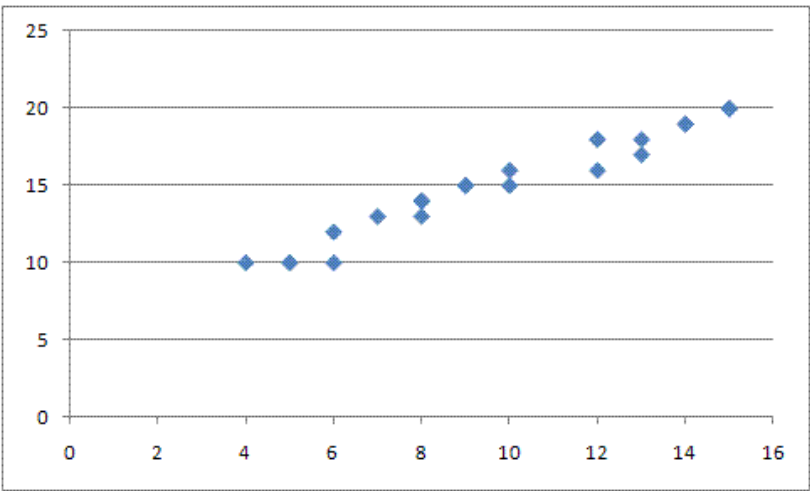


figura 2.4 Diagrama de dispersión. Fuente: Universidad de Valencia uv.es

2.4.4 Diagrama de causa y efecto

Consiste en un diagrama que muestra de manera visual todas las posibles causas de origen de un problema. Se representa por medio de una línea central tipo flecha que simboliza la problemática, de esta línea central a su vez se despliegan líneas categorizadas en seis factores: Mano de Obra, Método de trabajo, Medición, Medio Ambiente, Materia Prima y Maquinaria, dentro de cada uno de estos factores se encasillan las posibles causales del problema.

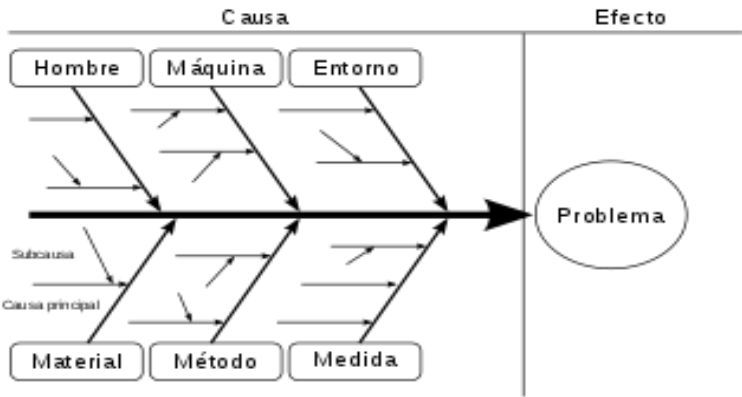


figura 2.5 Diagrama de causa y efecto. Fuente: wordpress.com

2.4.5 Graficas de control

Fue creado por Walter Andrew Shewhart en 1920. Esta herramienta es una representación gráfica de la variabilidad de un proceso a lo largo del tiempo. Tras establecer límites de control, esta grafica permite de manera sencilla conocer y evaluar el comportamiento del proceso revelando cualquier desviación que esté presente.

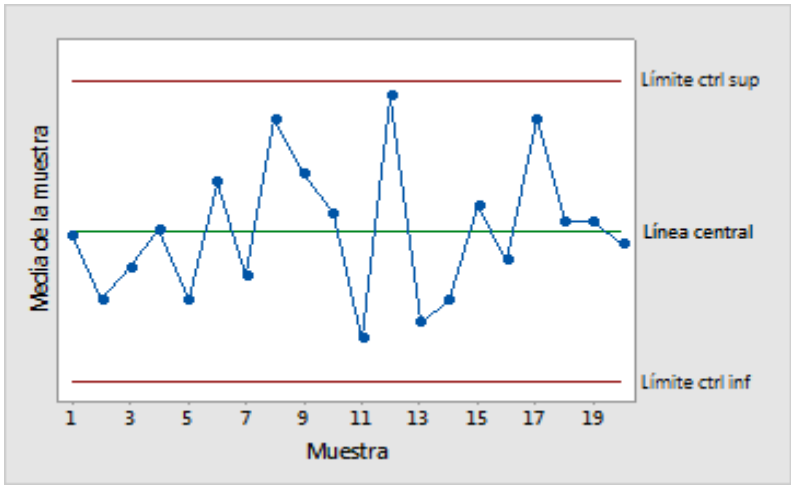


figura 2.6 Grafico de control. Fuente: support.minitab.com

2.5 ESTADO DEL ARTE

2.5.1 Plantas desaladoras en la Industria Minera

El actual escenario respecto al recurso hídrico a nivel país ha generado que la industria minera opte por el uso de agua de mar para satisfacer la necesidad de sus procesos productivos, lejos de la complejidad para obtenerla, su mayor disponibilidad la convierte en la opción más viable para asegurar el abastecimiento en sus operaciones. El agua es un recurso estratégico para la minería, su uso se hace indispensable durante todo el proceso, no obstante, su uso directo, como agua de mar bruta, solo es factible para ciertas etapas y cuando la tecnología empleada lo permite, por otra parte, es necesario contar con un agua libre de sales y/o minerales disueltos para las etapas más críticas, donde la pureza y calidad del producto final lo requiere. Desde este punto es donde entran en acción las plantas desalinizadoras. Dentro de las opciones de desalinización la más utilizada es la osmosis inversa, debido a que es la más eficiente en relación con el consumo de energía y el volumen de agua tratada, obteniendo de esta manera un flujo constante de producción. Desde esta perspectiva la implementación de la tecnología de osmosis inversa para el tratamiento de agua en uso industrial en minería ha aumentado de manera significativa en los últimos años y se espera que al 2034 el agua de mar represente el 69,8% del abastecimiento de agua para suplir la demanda por parte de la minería del cobre, según pronóstico entregado analista Sergio Verdugo (COCHILCO).

En virtud de este crecimiento en la implementación de este tipo de tratamiento, es necesario señalar que la industria minera ha sido el sector que ha impulsado la incorporación y desarrollo continuo de tecnología pensada en mejorar el rendimiento y la eficiencia de estas, obteniendo resultados favorables tanto para la operación como para el cuidado de los equipos asociados al proceso, brindando una mayor confiabilidad en la calidad de agua en las diferentes etapas.

Las operaciones mineras definen en base a sus necesidades e infraestructura la ubicación de sus plantas desalinizadoras, existen operaciones que instalan y operan dichas plantas en locaciones portuarias desde donde realizan el transporte del agua ya tratada hacia las faenas, como, en otros casos, realizan el transporte del agua de mar directamente hacia las faenas realizando el proceso de desalinización en el mismo emplazamiento de la extracción.

Bajo estas circunstancias, las plantas desalinizadoras ubicadas en las cercanías de la costa captan el agua directamente desde el mar, lo que genera muchas veces ciertas complicaciones en la producción debido a que la calidad del agua de alimentación al proceso puede sufrir variaciones importantes, debido principalmente a las fluctuaciones por temporales, corrientes típicas de cada estación, posibles vertidos próximos, etc.

Por otra parte, las operaciones mineras que poseen las instalaciones de desalación en el mismo lugar de extracción captan el agua de mar y la transportan a través de tuberías mediante un sistema de bombeo continuo que deposita el agua en piscinas con gran capacidad de almacenamiento y desde este punto es distribuido a las diferentes áreas, tanto para su uso directo como para las plantas desaladoras. Para este caso, existe un menor riesgo en las plantas de osmosis ante los cambios físicos de agua, ya que los sistemas de transporte de agua de mar desde la costa hacia las piscinas de almacenamiento requieren de su mejor calidad para su bombeo, no obstante, el agua almacenada de igual manera requiere de ciertos controles y tratamientos que eviten la proliferación de vida orgánica durante su tiempo de residencia, donde la alta variación de la temperatura repercute de manera negativa en este proceso, lo cual podría ocasionar ciertas complicaciones a lo largo de la operación.

2.5.2 Descripción del proceso de Osmosis Inversa

La desalinización es un proceso que consiste en separar las sales disueltas de un agua salobre obteniendo como resultado un agua dulce, la cual puede ser destinada al uso agrícola, industrial o para el consumo humano. Este proceso se puede llevar a cabo mediante la evaporación o destilación, congelamiento, electrodiálisis o intercambio iónico o por osmosis inversa, siendo este último, el método más común y rentable del mercado. Gracias al desarrollo de nuevas tecnologías relacionadas a este proceso se ha logrado reducir costos energéticos requerido para su funcionamiento, y a su vez, han mejorado notablemente el rendimiento y confiabilidad en su operación.

La osmosis inversa consiste en pasar agua salobre a alta presión a través de una membrana semipermeable en la cual se retendrán y separará casi en su totalidad las sales disueltas, obteniendo como resultado un agua dulce o permeada y por otra parte representado como rechazo, un agua con una mayor concentración de sales disueltas o salmuera.

El proceso que contempla el tratamiento de desalinización por medio de osmosis inversa no está lejos de complejidad, debido a que las variables que afectan este proceso dependen en gran medida de las condiciones geográficas de la región, estos son factores que el hombre no puede controlar y es por esta razón es que se deben crear estrategias para mitigar el impacto que generan estos cambios naturales sobre las plantas. Una de las principales maneras de lograr este control hace mención a la calidad de agua en la alimentación al proceso, en cuanto a esto, se consideran ciertos parámetros que se deben controlar y que son fundamentales para la estabilidad y acondicionamiento del agua en todas las etapas, este control se puede llevar a cabo inyectando una dosis adecuada de ciertos productos químicos que son necesarios en la estabilización de la calidad de agua, no obstante, el uso del producto químico adecuado para el tipo de agua a tratar también es de suma importancia y que debe ser previsto en la etapa de proyecto, de acuerdo con las características fisicoquímicas del agua a tratar.

2.5.3 Problemas más comunes en las Plantas de Osmosis Inversa

La osmosis inversa lejos de ser el método de desalación más eficiente en cuanto a implementación y costos de operación no está exenta de complejidades. Existen factores determinantes que deben ser considerados en la etapa de diseño del proyecto y que serán esenciales para mantener una operación estable y controlada. Esto incluye principalmente conocer la caracterización del tipo de agua a tratar, esto significa que, se deben realizar análisis fisicoquímicos que determinen los elementos presentes en el agua, de tal manera, permita seleccionar y configurar los equipos más apropiados para obtener los resultados deseados. No considerar estos factores podría generar que la operación sea ineficiente, impactando directamente en los costos operacionales. A continuación, se muestra un resumen de los problemas más comunes que experimenta un sistema de ósmosis inversa cuando no existe una estrategia operacional que ayude a mitigar la presencia de los diferentes contaminantes presentes en el agua.

La tecnología de desalación mediante membranas de osmosis inversa requiere de una calidad del agua de alimentación extremadamente restrictiva en cuanto a la turbidez y sólidos en suspensión, ya que una falta de control de estos parámetros podría ocasionar daños de manera acumulativa y cambio prematuro de las membranas.

La acumulación de contaminantes en la superficie de la membrana obstruye de manera contundente el paso de agua a través de esta. En este caso, hay muchos contaminantes que son invisibles para el ojo humano e inofensivos para nuestro organismo, pero son lo suficientemente grandes como para saturar rápidamente un sistema de ósmosis inversa. El tipo de ensuciamiento que se presentan en las membranas varía con el tipo de agua a tratar y se pueden clasificar de la siguiente manera:

- **Incrustaciones:** compuestos inorgánicos disueltos en una alta concentración pueden provocar incrustaciones en las membranas, estas incluyen el carbonato cálcico, sulfato de bario, sulfato de calcio, sulfato de estroncio y fluoruro cálcico.
- **Ensuciamiento coloidal:** es causado por la aglomeración de los coloides [ANEXO A] y su adherencia en las membranas.
- **Ensuciamiento orgánico:** las bacterias presentan uno de los problemas de saturación más comunes, debido a que las membranas de ósmosis inversa utilizadas hoy en día no soportan el uso de desinfectantes como el cloro y, por lo tanto, los microorganismos a menudo pueden prosperar y multiplicarse, produciendo biopelículas que cubren la superficie de la membrana y dan como resultado un alto grado de suciedad.

El método más efectivo y utilizado para la recuperación de la eficiencia de una membrana contaminada es la limpieza química, la cuál debe ser contemplado en los costos y tiempo dentro del programa de mantención de las plantas de manera periódica. Una frecuencia

de limpieza aceptable de membranas de Osmosis inversa está entre los 3 y 12 meses, cuando esta frecuencia es inferior a los 3 meses es necesario una reevaluación de diseño enfocado principalmente en el comportamiento de las etapas de pretratamiento.

Por este motivo los procesos de pretratamiento en la ósmosis inversa cumplen un rol fundamental en cuanto al aseguramiento de la calidad en el agua de alimentación. Estos se pueden clasificar en dos tipos que corresponden a tratamientos convencionales y tratamientos con membranas. Los primeros, consideran tecnologías como la desinfección, coagulación, floculación, decantación, flotación y filtración [ANEXO A]. En el caso de los tratamientos con membranas, se incluyen los procesos de microfiltración y ultrafiltración. Estos últimos suelen proporcionar mayor eliminación de partículas coloidales y bacterias que las tecnologías convencionales. Sin embargo, en algunas plantas el tratamiento convencional es suficiente para obtener la calidad de agua requerida para alimentar la ósmosis inversa.

En conclusión, el éxito operativo en cuanto a eficiencia y rendimiento de una planta de osmosis inversa dependerá directamente de la calidad de agua de alimentación, la cual obedece al desempeño operacional que debe cumplir la etapa de pretratamiento.

3 ANTECEDENTES GENERALES

3.1 Descripción de la Empresa

La empresa en donde se aplica el siguiente trabajo, es la operación minera que produce con menor ley de sulfuros de cobre, lo cual se constituye como un desafío constante en la búsqueda de alternativas y nuevas formas de llevar a cabo su producción, siendo pioneros en la explotación minera de baja ley, enfrentando los desafíos que otras compañías mineras tendrán en los próximos 10 años.

3.1.1 Excelencia Operacional

La empresa tiene como desafío mantener la competitividad y maximizar la producción, priorizando el mejoramiento continuo del negocio a través de la cultura de Cero Daño y el cuidado de las personas.

Entre los principales objetivos de gestión, está el agregar valor a través de la innovación, incorporando nuevas tecnologías y el uso eficiente de los recursos, para realizar el proceso productivo de forma sustentable y en armonía con el medioambiente, considerando la constante participación de sus comunidades vecinas.

3.1.2 Planta Desaladora

La planta desaladora está asentada en la faena minera ubicada al noroeste de la comuna de Sierra Gorda en la Región de Antofagasta.

Su función es producir agua permeada de uso industrial, para cubrir principalmente las necesidades de las áreas productivas en la extracción y recuperación de Cu, y, abastecer ciertas áreas de apoyo en faena.

3.1.3 Descripción del Proceso

La planta desaladora de Osmosis Inversa es sustentada con agua de mar por medio de bombas de impulsión directamente desde una piscina de almacenamiento, que, a su vez, es alimentada por un sistema de bombeo continuo con agua recuperada del proceso de enfriamiento de una planta termoeléctrica desde la comuna de Mejillones.

La planta desalinizadora cuenta con tres (3) subprocesos, que corresponden a dos etapas de pretratamiento o etapas de acondicionamiento del agua de mar y la osmosis inversa como etapa final.

3.1.3.1 Pretratamiento del Agua

El pretratamiento contempla dos subetapas detalladas a continuación.

3.1.3.2 Prefiltrado

El Prefiltrado corresponde a un método convencional, que consiste en el paso de agua por varias capas de medios filtrantes minerales de más gruesos a más finos contenidos en un filtro. Esta etapa cuenta con siete filtros Turbidex [ANEXO A], modelo TXAA-250, con una capacidad de retención de partículas de 3 a 5 μm como mínimo. Sin embargo, para que estos filtros puedan lograr esta capacidad de retención es necesario la dosificación de reactivos, que permiten el acondicionamiento del agua para mejorar su clarificación tras su paso por esta etapa.

La dosificación de reactivos se realiza en la línea de alimentación de agua a los filtros mediante bombas dosificadoras de ajuste manual. Estos reactivos corresponden a hipoclorito de sodio ($NaClO$) que tiene como función eliminar la materia orgánica presente en el agua, por otra parte, está el coagulante que es el encargado de clarificar el agua mediante la micro floculación de partículas suspendidas en el medio, logrando su retención de manera más efectiva.

Para medir la efectividad del proceso existen tres puntos de control que consiste en la toma de una muestra para su posterior análisis en laboratorio. Estas muestras corresponden a:

- ***Alimentación general Prefiltrado***, esta medición tiene como finalidad conocer las condiciones de calidad de agua de alimentación para un ajuste controlado en la dosificación de reactivos. Los parámetros que interés en este punto son:
 - Turbidez (NTU)
 - Sólidos Suspendidos Totales, SST (mg/l)
 - Hierro (mg/l)
 - Potencial de Reducción y Oxidación, ORP (mV).

- ***Alimentación con reactivos***, con esta medición podemos confirmar que la dosificación de reactivos se está realizando en función de los ajustes realizados en las bombas de dosificación, para lo cual se deben medir los siguientes parámetros:
 - Turbidez (NTU)
 - Cloro (mg/l)
 - Potencial de Reducción y Oxidación, ORP (mV).

- ***Servicio o Salida de Prefiltrado***, este último punto de medición indicará la efectividad en la retención en la etapa de Prefiltrado, corroborando un buen ajuste en la dosificación de reactivos. Los parámetros para medir son:

- Turbidez (NTU)
- Solidos Suspendidos Totales, SST (mg/l)
- Hierro (mg/l)
- Potencial de Oxidación y Reducción, ORP (mV).
- Cloro Residual (mg/l)

3.1.3.3 Ultrafiltración

Una vez pasada la etapa de Prefiltrado continúa la Ultrafiltración, que corresponde a un tratamiento con membranas. Para esta etapa del tratamiento se ha elegido un sistema de ultrafiltración presurizada con membranas de fibra hueca, y, la filtración es llevada a cabo desde dentro hacia fuera, lo que significa que las partículas quedan retenidas en la parte interior de la membrana. La ultrafiltración es un proceso de separación basado en una membrana porosa con aberturas de entre 0.01 y 0.1 micras más abiertas que la nanofiltración y ósmosis inversa. Las membranas trabajan con baja presión, lo que resulta en bajos costos de operación en base al consumo de energía y son muy eficaces como tratamiento previo a la ósmosis inversa, además cuentan con un sistema de retro lavado automático, lo que les proporciona un mayor tiempo de vida útil.

Esta etapa no requiere de la inyección de reactivos para acondicionamiento del agua, solo se utilizan reactivos en los lavados químicos que se realizan de manera automática con una duración de 45 minutos que, si requieren la inyección ácido cítrico, hidróxido de sodio e hipoclorito de sodio.

Se determina un punto de control de parámetros en línea en la descarga de esta etapa para evitar la entrada de agua de calidad inferior a la requerida para la osmosis, a su vez se realizan controles mediante toma de muestras específicas en laboratorio para contrastar los resultados de instrumentación. Los parámetros definidos para este punto de control corresponden a:

- Turbidez (NTU)
- Solidos Suspendidos Totales, SST (mg/l)
- Hierro (mg/l)
- Cloro Residual (mg/l)
- Medida de SDI (Índice de Densidad de Sedimentos) [ANEXO A]

3.1.3.4 Osmosis Inversa

La etapa osmosis inversa reciben el flujo de producto de la ultrafiltración con la calidad requerida para el proceso de desalación. En el ingreso se contempla la preparación química del agua de mar inyectando bisulfito de sodio, que tiene la finalidad de eliminar el cloro residual, y, la inyección de un agente inhibidor de incrustaciones. Está configurada con seis (6) módulos que producirán, según diseño, 90 l/s. Se realiza un diseño con una conversión nominal del 50 %. La parte equivalente al agua producida por cada bastidor se impulsará a las membranas mediante las bombas de alta presión (BAP). Gracias al funcionamiento de las BAP con variador de frecuencia, el punto de trabajo de las bombas podrá adaptarse a las distintas condiciones de trabajo, modificando principalmente la presión de trabajo, que varía en función de la salinidad del agua de mar, ensuciamiento de la membrana y de la temperatura.

Para el correcto funcionamiento de la etapa de osmosis inversa el plan de análisis determina los siguientes controles:

- ***Control de Proceso***, el control de proceso se realiza mediante instrumentación instalada en cada equipo con el fin de medir su desempeño y a su vez detectar cambios en el comportamiento de las variables que puedan comprometer la vida útil de estos.
 - Presión de Entrada
 - Caudal de Producto
 - Diferencial de Presión (Entrada/Salida)
 - Conductividad [ANEXO A]

- ***Control de la Calidad del Producto***, este control se realiza al agua producto mediante instrumentación y toma de muestras puntuales para análisis en laboratorio. Estos análisis corresponden a:
 - pH
 - Conductividad
 - Sales Totales Disueltas.

4 DESARROLLO

4.1 Planteamiento del Problema

La compañía minera, de manera constante, desarrolla e implementa nuevos métodos en sus líneas productivas, con el propósito de aumentar y mejorar la eficiencia de sus procesos productivos. Lo que, a su vez, impacta directamente en las exigencias en cuanto a la disponibilidad de recursos en las áreas de apoyo.

Como se ha analizado, la planta desaladora es un área de apoyo con una función estratégica que impacta transversalmente en las instalaciones de la faena. Esta relación directa con la producción y el soporte a las actividades de extracción resaltan su importancia.

La planta de ósmosis inversa enfrenta una alta frecuencia en la implementación de acciones correctivas para preservar su eficiencia operativa. Estas acciones, sin embargo, incrementan los costos de producción debido al uso intensivo de insumos químicos y, además, reducen la disponibilidad de equipos, debido a las detenciones para la ejecución de dichas acciones. Situación, que ha afectado ocasionalmente la continuidad operativa de ciertos procesos. Para el área de operaciones contar con un proceso eficiente y controlado es fundamental para el cumplimiento de los objetivos, por esta razón es necesario analizar e implementar mejoras sumado al desarrollo de estrategias que permitan reducir dichos costos y asegurar la producción.

4.1.1 Evaluación del estado actual del proceso

Evaluar el estado actual del proceso es esencial para establecer la posición presente y determinar las metas futuras con respecto a la elaboración e implementación de mejoras en el proceso.

Antes de continuar al análisis del proceso, es imperativo destacar que la implementación de medidas correctivas es vital para recuperar la eficiencia y garantizar la seguridad de los equipos afectados. Entre estas medidas, se encuentra la realización de un lavado químico. Es esencial, que durante la planificación de este procedimiento se debe tener en cuenta tanto el período de inactividad del equipo como los costos implicados por el uso de insumos químicos.

Para realizar una evaluación precisa del estado actual del proceso de tratamiento de agua, se tomarán en cuenta los siguientes elementos:

- **Consumo y costo de Insumos Químicos:**
 - Se analizarán los datos de consumo de insumos químicos y recopilados durante el período de un año.

- **Disponibilidad de Equipos:**
 - Se revisarán los registros de detenciones y causas para correlacionarlos con el consumo de insumos.
- **Factores de Impacto:**
 - Se evaluará cómo la disponibilidad de equipos en la planta de Osmosis Inversa influyó en los volúmenes de tratamiento.

4.1.2 Consumos y costos de Insumos Químicos

Para calcular los costos adicionales de productos químicos se considera, como tiempo aceptable entre lavados químicos, un período de 3 (tres) meses de acuerdo con las recomendaciones entregadas por los fabricantes de membranas de osmosis inversa.

En la siguiente descripción se detalla el número de equipos de la etapa osmosis inversa incluyendo la cantidad en kilos (kg) de productos químicos utilizados en cada lavado.

- Cantidad de módulos de Osmosis Inversa 6 bastidores
- Consumo “Genesol 37” por ciclo cada 3 meses* 100 kg/bastidor
- Consumo “Genesol 704” por ciclo cada 3 meses* 100 kg/bastidor

*Cada ciclo considera el lavado con ambos productos en dos modulo por mes.

Consumo de químicos en Lavados de Osmosis Inversa				
mes	Consumo actual Genesol 37 (kg)	Consumo ideal Genesol 37 (kg)	Consumo actual Genesol 704 (kg)	Consumo ideal Genesol 704 (kg)
ene-22	425	200	225	200
feb-22	275	200	275	200
mar-22	275	200	275	200
abr-22	350	200	425	200
may-22	325	200	325	200
jun-22	900	200	900	200
jul-22	325	200	375	200
ago-22	775	200	825	200
sept-22	800	200	800	200
oct-22	550	200	525	200
nov-22	650	200	875	200
dic-22	950	200	900	200
Total, Kilos	6600	2400	6725	2400

TABLA 4.1 CONSUMO DE QUÍMICOS EN LAVADOS DE OSMOSIS INVERSA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Costos Asociados a Lavados de Osmosis Inversa			
Producto Químico	Costo lavado imprevisto	Costo lavado condiciones Normales	Diferencia
Genesol 37	\$57.552	\$20.928	\$36.624
Genesol 704	\$60.391	\$21.552	\$38.839
Total	\$117.943	\$42.480	
Diferencia de Costos			\$75.463

TABLA 4.2 COSTOS ASOCIADOS A LAVADOS DE OSMOSIS INVERSA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

De acuerdo al detalle de la tabla 4.1, de consumo de productos químicos en lavado de osmosis inversa y los costos por consumo asociados a dicha actividad en tabla 4.2, se realiza un comparativo de los gastos en condiciones normales de operación contemplando un lavado periódico de tres (3) meses mínimos, en contraste con los costos que actualmente se realizan debido a la ejecución de lavados químicos correctivos en los módulos de osmosis inversa, obteniendo un gasto de US\$ 75.463 sobre lo normal en el período de un año.

4.1.3 Disponibilidad de Equipos

Para analizar la disponibilidad de equipos de ósmosis inversa de manera efectiva, es recomendable estructurar una tabla que detalle los factores que provocan la detención de los módulos. Esta tabla incluye, la cantidad de incidentes y el tiempo total de no disponibilidad del equipo, en un período de 3 (tres) meses, correspondientes a los meses críticos de detenciones.

Causas de no Disponibilidad de Equipos			
Factor de detención	Descripción	Cantidad Detenciones	Tiempo de Detención (h)
Motivos Operacionales	* Detenciones programadas. * Detenciones imprevistas. * Limpieza de Membranas. * Cambio de filtros.	27	382,5
Imprevistos Mecánicos	* Interrupciones inesperadas debido a fallos en componentes críticos.	7	25
Programados Mecánicos	* Mantenimientos rutinarios para preservar la funcionalidad del equipo.	3	20
Imprevistos Eléctricos	* Interrupciones inesperadas debido a fallos en instrumentación y comunicación.	2	5
Otros	*Black Out * Interrupción del tratamiento en Planta Concentradora	5	3
Total		44	435,5

TABLA 4.3 CAUSAS DE NO DISPONIBILIDAD DE MÓDULOS DE OSMOSIS INVERSA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

De acuerdo con los datos analizados y ordenados en la tabla 4.3, se logra comprobar que las principales causas que originan la mayor cantidad de horas en la detención de módulos corresponden a factores Operacionales con un total de 382,5 horas, alcanzando un 87% del total de las detenciones. Para entender de manera más clara y comparar el impacto de cada factor se realiza un diagrama de Pareto con los datos utilizados.

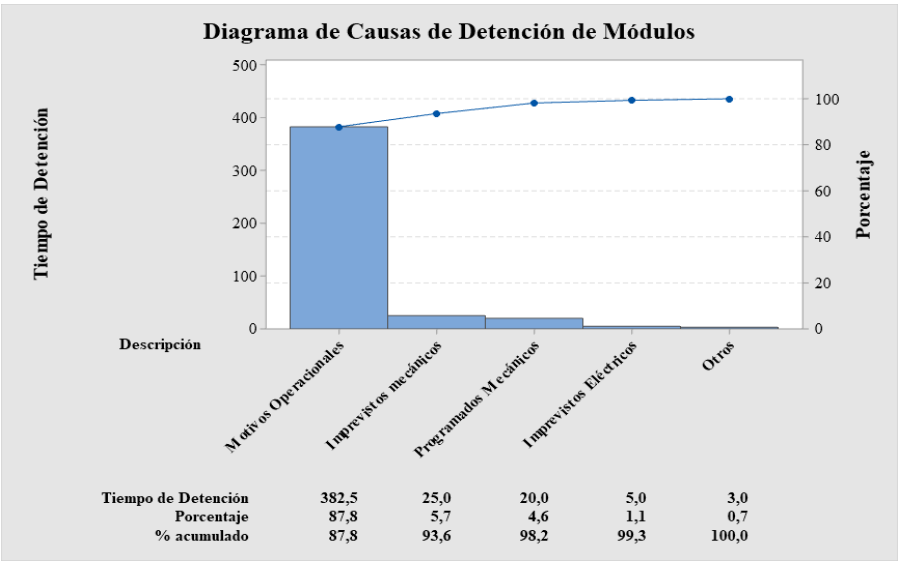


figura 4.1 Causas de detención de módulos. Fuentes: Elaboración propia

• **Motivos Operacionales**

Los motivos operacionales engloban las causas que pueden provocar una detención total o parcial de la planta, atribuibles a la operación. Estos se clasifican de la siguiente manera:

Causas de no Disponibilidad de Equipos por Motivos Operacionales			
Factor de detención	Descripción	Cantidad Detenciones	Tiempo de Detención (h)
Limpieza de Membranas	Intervenciones debido a la pérdida de eficiencia operativa: - Saturación y acumulación de suciedad en las membranas.	18	360
Programados	Trabajos de modificación o mejoras operacionales planificados: - Previa planificación de recursos dentro de tiempos limitados	4	14
Improvisos	Interrupciones no planificadas durante la operación: -Variaciones inesperadas en la presión o flujo del agua.	3	6
Seguridad	Pérdida de continuidad en la dosificación de químicos.	2	2,5
Total		27	382,5

TABLA 4.4 CAUSAS DE NO DISPONIBILIDAD POR MOTIVOS OPERACIONALES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

De acuerdo con los registros obtenidos y desglosados de la disponibilidad de equipos de ósmosis inversa, se observa que más del **90%** de las detenciones de módulos de ósmosis inversa corresponden a la limpieza de membranas. Este dato es significativo, ya que indica que la mayoría de las interrupciones de la operación no se deben a fallas del equipo o problemas externos, sino que a la ejecución de acciones correctivas.

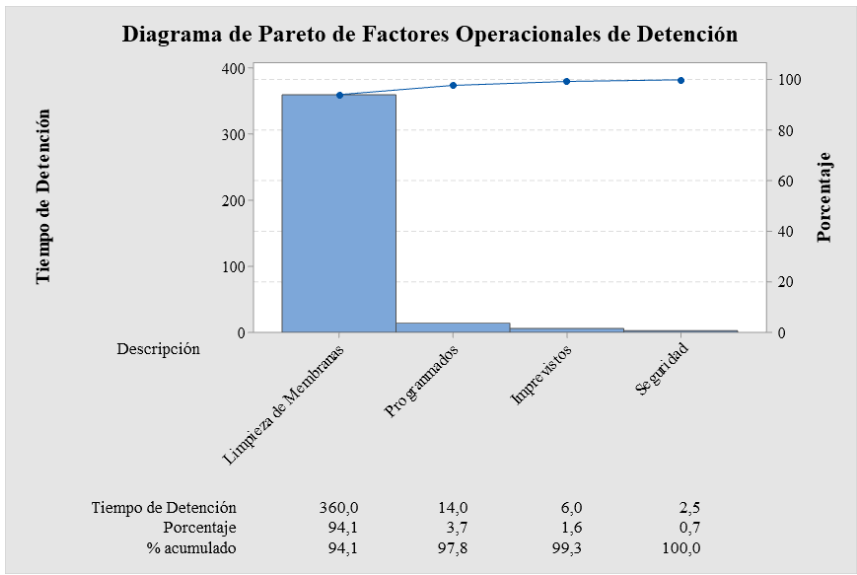


figura 4.2 Factores operacionales de detención. Fuente: Elaboración propia

4.1.4 Factores de Impacto

Cada vez que se detiene un módulo de ósmosis inversa para la limpieza de sus membranas, se produce una reducción significativa del 16,5% en el volumen de agua permeada. Esta disminución en la producción total tiene como consecuencia directa que los estanques de reserva operen por debajo del nivel óptimo, lo cual compromete su capacidad para satisfacer adecuadamente la demanda de agua de las áreas cliente. La baja del 16,5% en la producción es un dato crítico que resalta la importancia de la eficiencia en el proceso de limpieza.

4.2 Aplicación PDCA

Considerando la evaluación de detenciones y costos, el área de operaciones establece realizar un plan de acción que pueda determinar las falencias del proceso e identificar las causas que provocan la pérdida prematura de eficiencia de los módulos de osmosis inversa con el objetivo de definir e implementar mejoras, de acuerdo con los grados de dificultad en la implementación, plazo de ejecución e impacto esperado en el proceso.

4.2.1 Plan

4.2.1.1 Definición del Problema

La detención de módulos por motivos operacionales imprevistos concentra el mayor número de registros entre los meses de más baja producción. La saturación de las membranas de osmosis inversa genera una pérdida de eficiencia de los módulos, lo que impide una operación segura, tanto para los equipos como para el personal.

La baja eficiencia de trabajo se presenta con los siguientes síntomas:

- **Aumento en la presión de trabajo:** Puede generar deterioro en las membranas por el desplazamiento de sus capas o por el aumento de las incrustaciones en la superficie filtrante, causando daños irreversibles que reducen la vida útil de estas.
- **Aumento de la presión diferencial:** La presión diferencial es el resultado de la diferencia entre la presión de entrada y salida de los módulos, es decir, entre la parte frontal y posterior de la membrana, siendo menor la presión en la parte posterior se puede generar el desplazamiento de las mallas separadoras de las capas filtrantes dejando totalmente inservible la membrana.
- **Aumento de la conductividad en el agua de producto:** Ocasiona que la calidad requerida del agua de producto disminuya, debido al aumento del paso de sales hacia el agua permeada.
- **Disminución del flujo de producto:** La saturación en la superficie de las membranas evita parcialmente el paso de agua a través de estas, aumentando el flujo de rechazo y disminuyendo el agua producto.

Basado en el análisis de los problemas más comunes presentados en las plantas de osmosis inversa, una frecuencia de tiempo aceptable en la ejecución de lavados químicos es de tres (3) a doce (12) meses, y que, cuando es inferior a este periodo es necesario realizar una reevaluación en el diseño enfocado en las etapas de pretratamiento del agua.

4.2.1.2 Planificación

➤ **Objetivos:**

- Identificar la causa raíz de la pérdida de eficiencia de los módulos de osmosis inversa.
- Analizar e Implementar mejoras que permitan mantener la eficiencia del proceso.
- Estandarizar los procedimientos y métodos de trabajo para enfrentar las falencias o déficit del proceso en el futuro.

➤ **Actividades:** Diagrama de Gantt [ANEXO 1]

- Definir objetivos.
- Planificación y Preparación
- Medir y analizar el proceso.
- Analizar causas raíz.
- Analizar y categorizar soluciones.
- Preparar e implementar las soluciones.
- Verificar y controlar proceso.
- Estandarizar o modificar soluciones.

4.2.1.3 Medición y Análisis del Proceso

Para entender y comprender el análisis del proceso, se debe considerar que ambas etapas del pretratamiento en conjunto deben garantizar un agua de calidad en la alimentación de los módulos de osmosis inversa.

El siguiente diagrama detalla el proceso de desalinización, en donde se detallan las etapas con sus respectivos puntos de muestreo y dosificación de químicos para el acondicionamiento y control de la calidad del agua a través del proceso.

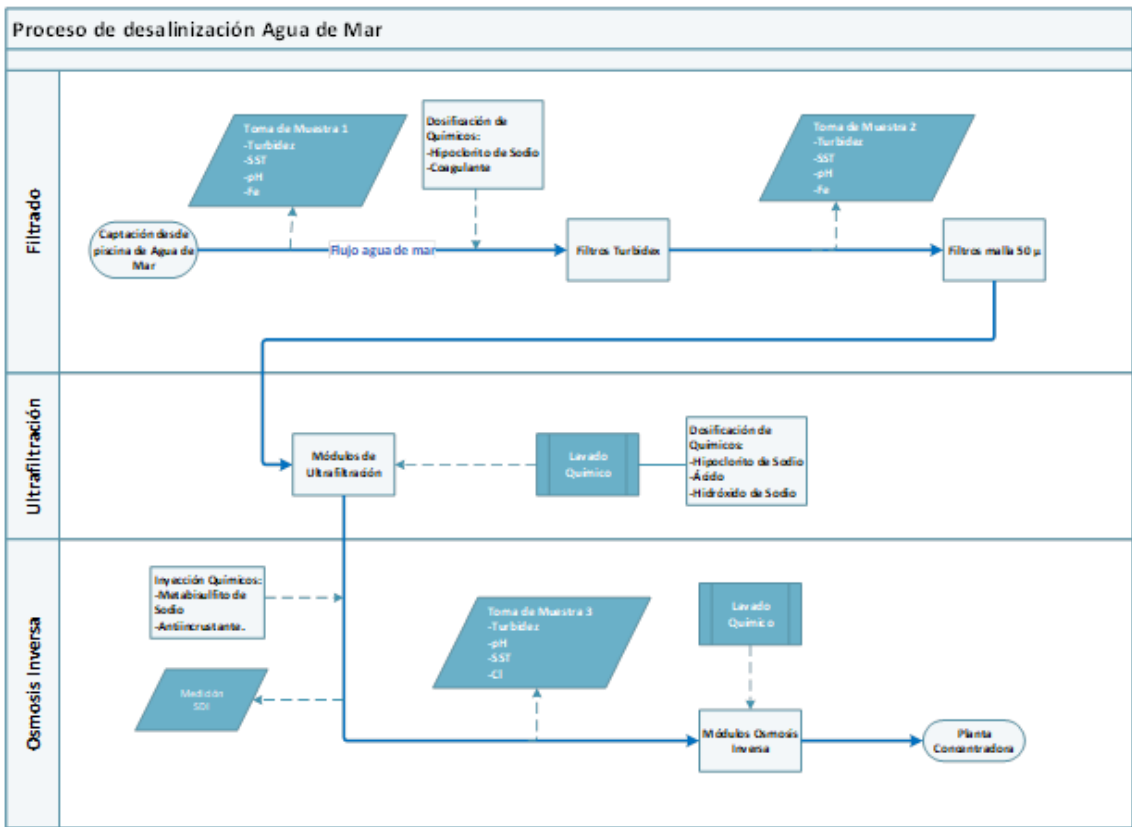


figura 4.3 Diagrama de Proceso osmosis inversa. Fuente: Elaboración propia

La calidad en el agua de alimentación a la etapa de osmosis inversa está determinada por tres (3) parámetros fundamentales que definirán el comportamiento referente a la eficiencia de trabajo del proceso. Los parámetros por analizar corresponden a las mediciones de las variables de:

- **SDI:** el “Índice de Densidad de Sedimento” es una prueba que estima el grado de ensuciamiento de las membranas de osmosis inversa por agentes contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes en el agua.
- **Turbidez:** es una medida indirecta del agua y dependen de la cantidad de carga orgánica, biológica e inorgánica de tamaños microscópicos presentes en el agua mediante el paso de la luz dispersa en este medio.

➤ **TSS:** el “Total de Sólidos Suspendidos” es la medición que representa la cantidad de los sólidos que se encuentran suspendidos en el agua y se miden mediante peso gravimétrico.

Para realizar las mediciones de estos parámetros se establecen cumplir con ciertas condiciones en la operación de la planta de OI durante todo el período definido para realizar la actividad, con el propósito de obtener una mayor representatividad en los resultados y posterior análisis. A continuación, se describen los requisitos establecidos:

- Mantener un flujo estable de alimentación hacia etapa de osmosis inversa, para este caso cinco (5) módulos en operación más uno (1) en reserva, para mantener continuidad en caso de detención imprevista de algún módulo que se encuentre en servicio. Con 5 módulos en servicio se alcanza un flujo promedio de 620 m³/h.
- Mantener estabilidad en la dosificación de los químicos utilizados en el acondicionamiento del agua de mar en las etapas de pretratamiento, este flujo de inyección será según los parámetros de diseño de los equipos. Como agente coagulante se utiliza CLARISOL 5200 (nombre comercial) [ANEXO A], la dosificación de diseño es 3 mg/l.

4.2.1.3.1 Análisis de SDI

La medición se realiza en un punto específico adecuado con los implementos necesarios para el desarrollo de la actividad, ubicado en la línea de alimentación de agua de mar hacia la etapa de OI, posterior a las etapas de pretratamiento. La medición se concretará durante un período de 14 días (dos turnos), con mediciones cada dos (2) horas, esto proporcionará un total de doce (12) muestras por día [ver ANEXO 1: Tabla de datos de medición de SDI].

Para el análisis de los datos obtenidos se genera la siguiente grafica de control, de la cual se obtendra la información requerida referente a la estabilidad del proceso de pretratamiento de la planta desaladora respecto a la medición del índice de saturación.

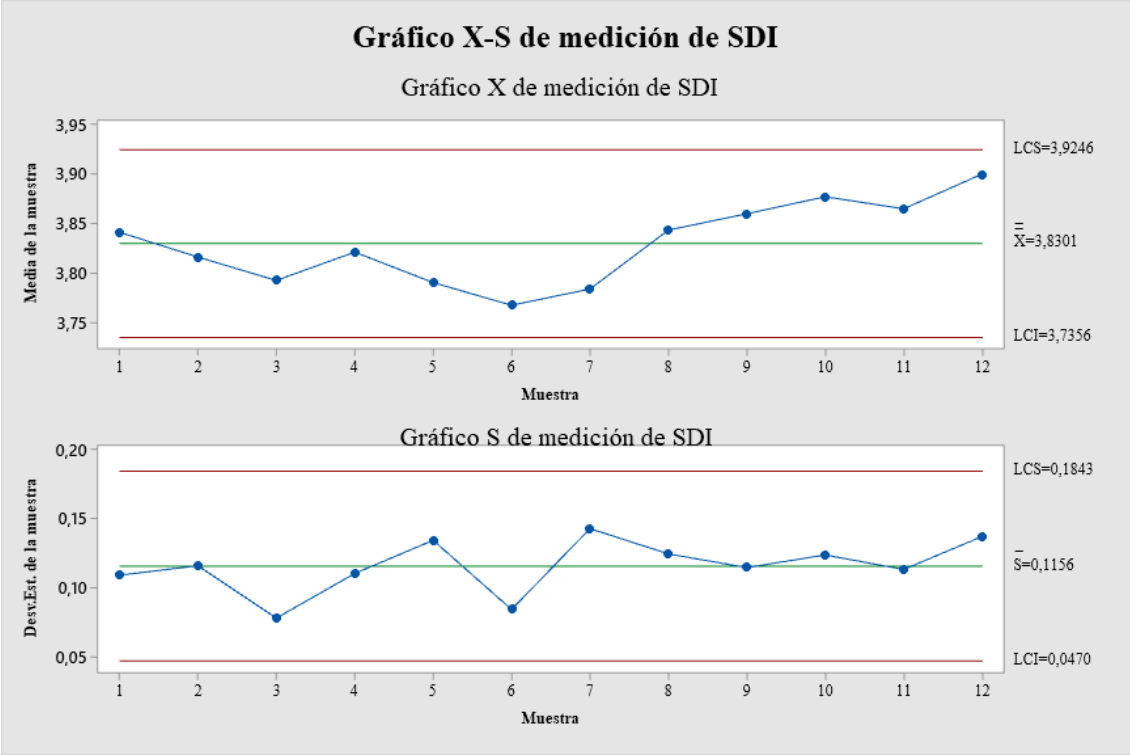


figura 4.4 Grafico de control medición de SDI. Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con el resultado de la gráfica de control X-S podemos determinar que el proceso obedece a un comportamiento de estabilidad respecto a las mediciones, con un SDI promedio de 3,83 y una desviación estándar dentro de los límites de control. Sin embargo, los promedios mínimos de las muestras se encuentran sobre el valor de 3,73 y de acuerdo con las recomendaciones ASTM en relación los valores óptimos, estos deben ser $SDI < 3$ en un proceso eficiente. Con el análisis de los resultados de las mediciones, podemos deducir en primera instancia, que el proceso de pretratamiento no está garantizando la calidad de agua requerida para el correcto desempeño de la OI.

4.2.1.3.2 Análisis de Turbidez (NTU)

Bajo las mismas condiciones operacionales de la medición anterior y en forma paralela se realizan las tomas de muestras y análisis de agua para la obtención de la turbidez. Esta medición se realizará específicamente en la alimentación y descarga de la etapa de Prefiltrado [Ver Anexo 2: Tablas de medición de Turbidez de alimentación y descarga de Prefiltrado], con el fin de obtener un comparativo entre ambas mediciones para determinar el porcentaje de retención de los filtros en esta etapa del proceso.

Para determinar el porcentaje de retención se utiliza la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Retención} = \frac{\text{turb } i - \text{turb } f}{\text{turb } i} \times 100\%$$

[Ver Anexo 3: Tabla de porcentaje de retención Prefiltrado].

De las mediciones realizadas se despliegan la siguiente gráfica para su posterior análisis.

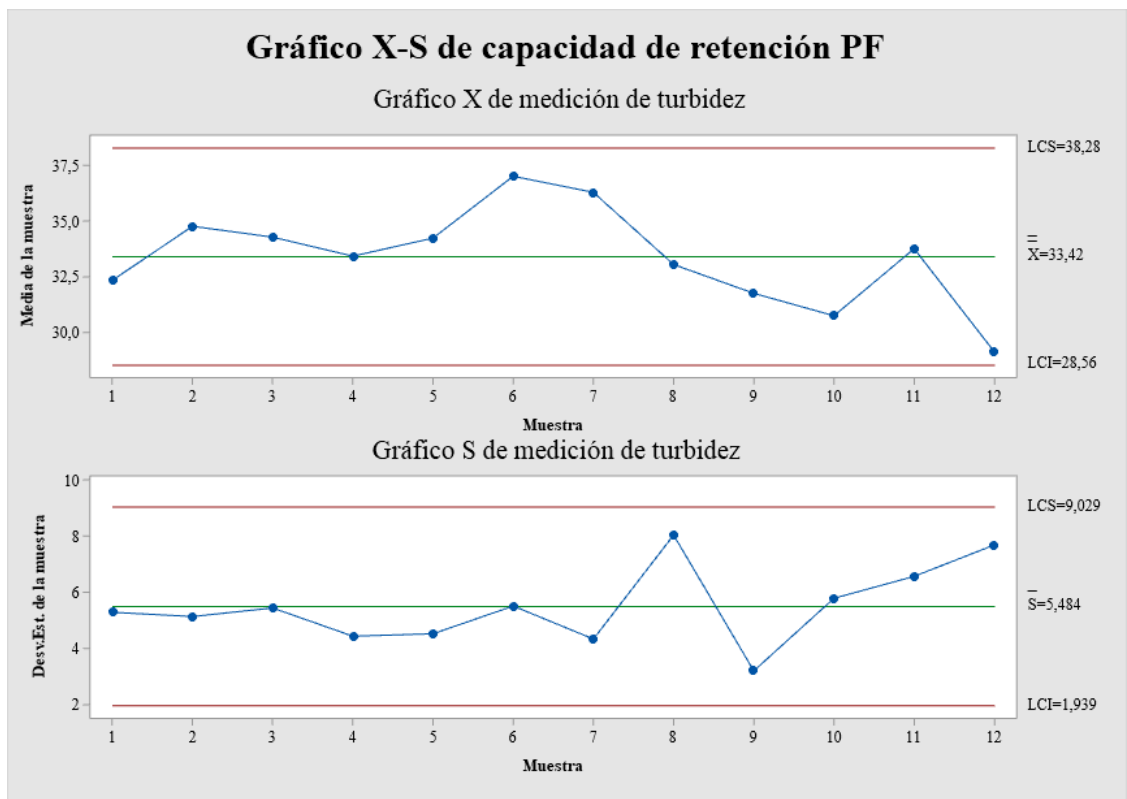


figura 4.5 Grafico de control capacidad de retención PF. Fuente: Elaboración propia

El análisis de la gráfica X, que representa el porcentaje de retención de los filtros durante la etapa de Prefiltrado, muestra que la variabilidad de las medias se encuentra dentro de los límites de control establecidos. Esto demuestra que el proceso mantiene una estabilidad en la operación. Sin embargo, la eficiencia de filtrado en esta etapa debería alcanzar el 75%. En este caso, el porcentaje más alto registrado no excede el 35%, lo cual señala una oportunidad significativa de mejora en la eficacia de la filtración. Adicionalmente, la gráfica S confirma la estabilidad del proceso, con una desviación estándar que no sobrepasa los límites de control. Esto lleva a concluir examinar otras variables que podrían influir en la eficacia de la filtración.

4.2.1.3.3 Análisis de Total de Sólidos Suspendidos (TSS)

Al igual que las mediciones anteriores de NTU se realiza la medición de TSS en el agua de alimentación a la osmosis inversa o descarga de la etapa de pretratamiento. Para la evaluación del TSS se debe tener en cuenta que, el resultado de la medición debe ser < 5 ppm, para asegurar la calidad requerida en la operación optima de la OI [Ver Anexo 4: Tabla de medición de TSS (Sólidos Suspendidos Totales)].

De los resultados de las mediciones se despliega la siguiente gráfica.

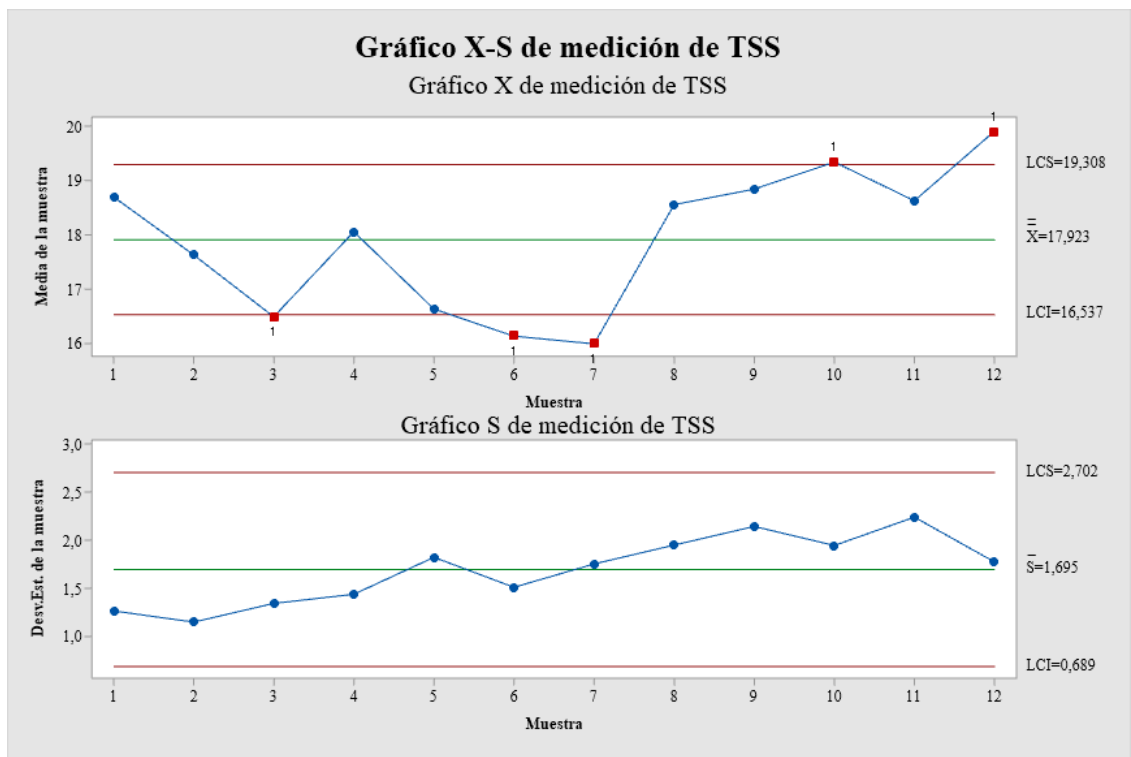


figura 4.6 Grafico de control medición de TSS. Fuente: Elaboración propia

Según los resultados de la medición de TSS plasmados en la gráfica de control X, se puede apreciar un comportamiento inestable, con varios puntos fuera de los límites de control con oscilación en su proyección y una media promedio de 14,98 ppm, sobre el límite recomendado para un agua de calidad en alimentación a la OI.

En la gráfica S los resultados de las desviaciones estándar promedio presenta un comportamiento estable dentro de los límites de control.

4.2.1.3.4 Análisis de Causa Raíz

Basado en los resultados obtenidos en la medición de los parámetros de interés, asociados a la calidad del agua de alimentación a la OI, se procede al análisis, en conjunto con el equipo de trabajo de operaciones, se constituye como objetivo los siguientes puntos:

- Evaluación de causa raíz del alto grado de saturación (SDI).
- Análisis de causa raíz de la baja capacidad de retención de los filtros Turbidex (NTU)
- Evaluación de causa raíz del alto resultado de TSS en el agua de alimentación a OI.

De acuerdo a la bibliografía que hace referencia al comportamiento y problemas más comunes en las plantas de osmosis inversa, sumado a la experiencia en terreno de los operadores de estas mismas, se define analizar la relación entre las variables anteriormente estudiadas, debido a que el alto grado de saturación obtenido de la prueba de SDI y el alto resultado de los TSS obedecen directamente al comportamiento deficiente de las etapas de pretratamiento, por lo tanto, para comprobar y asegurar un buen diagnóstico se realiza el análisis de correlación con las medias obtenidas del análisis anterior, considerando como variable independiente el porcentaje de retención y como variables dependientes la medición del grado de saturación (SDI) y la medición del total de sólidos suspendidos (TSS), de lo cual se desprenden los siguientes resultados.

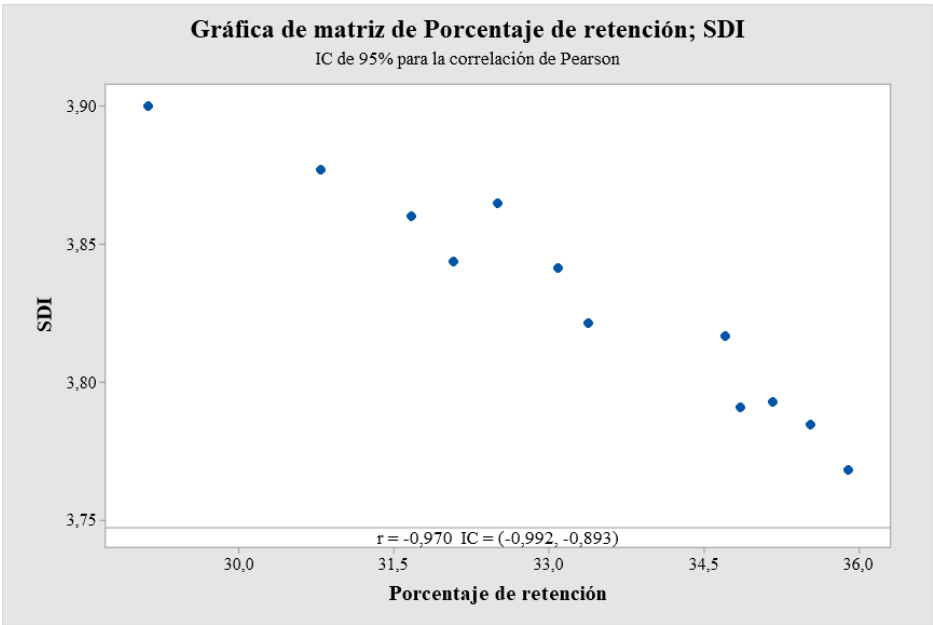


figura 4.7 Correlación de SDI y porcentaje de retención PF. Fuente: Elaboración propia

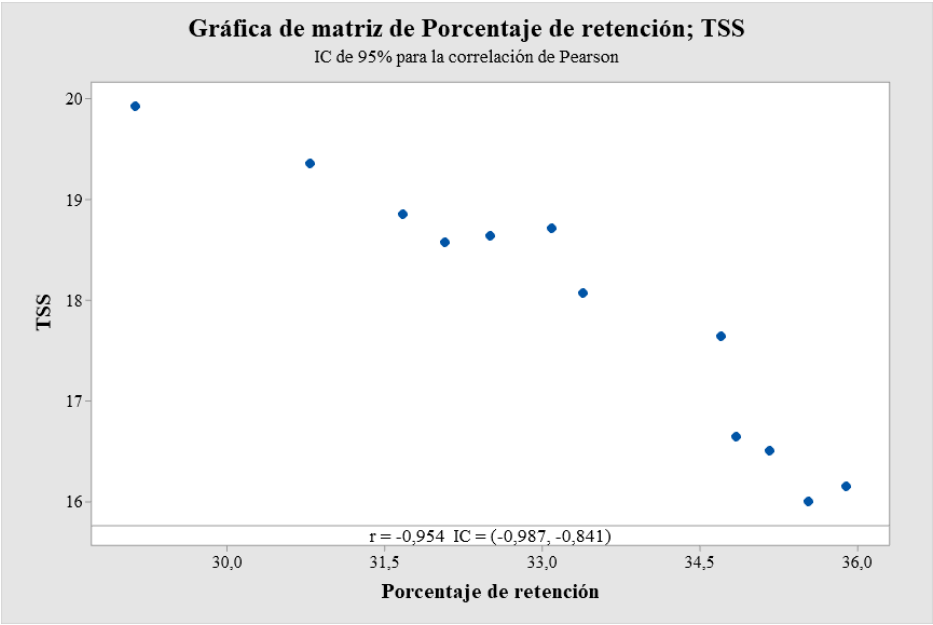


figura 4.8 Correlación de TSS y porcentaje de retención PF. Fuente: Elaboración propia

El resultado obtenido en ambas gráficas de correlación, indica que cuando el porcentaje de retención aumenta, la medición del SDI y TSS disminuyen, por lo tanto, existe un coeficiente de correlación con dirección negativa para esta prueba. Además, el valor “r” entre -1 y -0,7 como resultado para ambas pruebas se evidencia una correlación muy alta, lo cual confirma estadísticamente la hipótesis planteada por el equipo.

De acuerdo con los resultados en las pruebas de correlación es concluyente la necesidad de evaluar la baja capacidad de retención de partículas de los filtros Turbidex, ya que se considera la causante de los resultados deficientes en la calidad de agua de alimentación a la osmosis inversa.

4.2.1.3.5 Lluvia de ideas para posibles Causa Raíz

Para la evaluación de la baja eficiencia de la etapa de pretratamiento, el equipo de trabajo participa en la elaboración de un esquema de lluvia de ideas, con el propósito de plantear, basado en la experiencia y soporte técnico de los manuales de operación, los diferentes causales que afectan y que podrían ser determinantes en el comportamiento del proceso de filtración del agua de mar durante la operación.

La problemática se plantea de la siguiente manera: “Se ha identificado una deficiencia significativa en la etapa de prefiltrado del sistema de tratamiento de agua, donde la eficiencia de retención de partículas suspendidas actualmente es solo del 35%, considerablemente por debajo del objetivo de diseño del 75%”.

Para optimizar los resultados del Análisis de Causa Raíz, se propone una metodología de lluvia de ideas estructurada en torno a los tres subprocesos clave de la etapa de filtrado. Estos subprocesos, que reflejan la secuencia operativa interna, se detallan a continuación con las respectivas causas principales y secundarias, para facilitar una evaluación sistemática y exhaustiva [ver Anexo 5: Diagrama de análisis Causa Raíz].

Tabla de lluvia de ideas.		
Subproceso	Causa Principal	Causa Secundaria
Proceso de Dosificación	Estanqueidad de válvulas	Sellos dañados
		Sellos obstruidos
	Embancamiento de línea de dosificación	Acumulación de sedimentos
	Eficiencia de la bomba dosificadora	Capacidad de bombeo
		Componentes dañados
Proceso de Coagulación	Estado del químico coagulante	Cambios fisicoquímicos
	Caudal de Operación	Variación en el flujo de alimentación
	Efectividad del químico Coagulante	Composición química
		Dosis adecuada
Proceso de Retención	Falta de carga del medio filtrante	Rotura de toberas de retención de carga
	Eficiencia del medio filtrante	Vida útil del medio Filtrante

TABLA 4.5 LLUVIA DE IDEAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

4.2.1.3.6 Análisis y categorización de soluciones

➤ **Evaluación de Causas**

Con las ideas detalladas para cada subproceso, se elabora una tabla en la cual se procede a detallar cada posible causa con su respectiva medición, con la cual se enumera y define una ruta de actividades para determinar con certeza cual o cuales posibles causas podrían estar provocando el mal desempeño del proceso.

Tabla de evaluación de causas		
Número	Posibles causas	Evaluación de causas
1	Sellos dañados	Realizar aforo de succión
	Sellos obstruidos	
	Acumulación de sedimentos	
	Capacidad de bombeo	
	Componentes dañados	
2	Rotura de toberas de retención de carga	Apertura de filtro y medir volumen de carga
3	Vida útil del medio Filtrante	Apertura de filtro e inspeccionar visualmente estado de carga
		Determina el tamaño efectivo y la uniformidad del medio filtrante
4	Cambios fisicoquímicos	Realizar test de jarra
	Composición química	
	Dosis adecuada	
5	Variación en el flujo de alimentación	Realizar seguimiento de caudal de operación

TABLA 4.6 EVALUACIÓN DE CAUSAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Cada evaluación de causas requiere de un proceso y planificación, la prioridad de ejecución para cada una de ellas dependerá del tiempo, complejidad y recursos necesarios. La prioridad de ejecución se evalúa de la siguiente manera:

- **“Nivel I”:** Tareas simples que no requieren más de 1 hora de ejecución y lo puede realizar un operador.
- **“Nivel II”:** Tareas regulares que requieren más de 2 horas en la ejecución y posiblemente más de un operador.
- **“Nivel III”:** Tareas complejas que requieren más de 12 horas y recursos adicionales de apoyo en la ejecución.

Definidos los distintos niveles se establece la categorización para cada actividad resultando el siguiente modelo:

Categorización de Ejecución		
Prioridad de ejecución	Descripción de la tarea	Categorización
1	Aforo de bomba dosificadora	Nivel I
2	Medición de caudal de operación	Nivel I
3	Test de Jarra	Nivel II
4	Apertura de filtro Medir volumen de carga Inspección visual por estado de carga	Nivel III

TABLA 4.7 CATEGORIZACIÓN DE EJECUCIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

4.2.1.3.7 Resultado de evaluación de causa raíz

Del resultado de las tareas realizadas se obtiene información con la cual se logran descartar posibles causas en la baja eficiencia del proceso.

- **Aforo de bomba dosificadora:** Es la medición del paso de un fluido por un punto específico en un tiempo determinado.

Con esta prueba se puede verificar que el funcionamiento de este equipo sea el óptimo para su función, pudiendo descartar algún desperfecto mecánico o de accesorios asociados a su operación.

Los resultados obtenidos del aforo son los siguientes:

Resultado de aforo de bombas dosificadoras		
Equipo	Resultado esperado	Resultado obtenido
6351-BD-03	10 l/h	10,28 l/h
6351-BD-04	10 l/h	10,09 l/h

TABLA 4.8 RESULTADO DE AFORO DE BOMBAS DOSIFICADORAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Tabla 4.4 Resultado de aforo de bombas dosificadoras. Fuente: elaboración propia

De los resultados obtenidos en la medición, existe una diferencia entre el volumen obtenido y lo esperado. Esta diferencia se encuentra dentro de lo esperado para este tipo de prueba debido a los cambios físicos que la temperatura provoca en el producto químico transportado, y, se descarta algún tipo de desperfecto en ambas bombas dosificadoras.

- **Medición de caudal de operación:** es la medición que corresponde a la cantidad de flujo que pasa a través de los filtros.

Con esta seguimiento se puede conocer si, de acuerdo al diseño, existe un caudal bajo o sobre lo recomendado, lo cual puede alterar la velocidad de decantación de los TSS,

generando resultados no deseados en la calidad del agua de producto, debido a que, un caudal sobre lo recomendado puede ocasionar que las partículas pasen a través del lecho filtrante sin ser retenidas por este, además de provocar canalizaciones de flujo, lo que evitaría que el agua pase a través del lecho y con esto la suciedad y contaminantes presentes en el agua de alimentación. Por otra parte, un caudal bajo lo recomendado aumenta la posibilidad de proliferar microorganismos en el medio filtrante y además obtener un rendimiento ineficiente al tener un recorrido más lento de flujo.

Rango de Caudales de Operación Filtros				
Modelo Filtros TX / Acero	Caudales de Operación (m 3/h)			
	Min.	Máx.	Retrol.	Nominal
TXMA / TXAA-50	5,7	9,6	6,7	8,3
TXMA / TXAA-75	12,8	21,6	15,0	18,8
TXMA / TXAA-95	20,6	34,7	24,1	30,1
TXMA / TXAA-105	25,1	42,4	29,4	36,8
TXMA / TXAA-120	32,8	55,4	38,5	48,1
TXMA / TXAA-135	41,5	70,1	48,7	60,8
TXMA / TXAA-150	51,2	86,6	60,1	75,1
TXMA / TXAA-180	73,8	124,7	86,5	108,2
TXMA / TXAA-210	100,4	169,7	117,8	147,2
TXMA / TXAA-250	142,4	240,5	166,9	208,7
TXMA / TXAA-300	205,0	346,4	240,3	300,5

TABLA 4.9 RANGO DE CAUDALES DE OPERACIÓN FILTROS. FUENTE: FICHA TÉCNICA DE FILTROS TX/ACERO

Los datos de caudal se obtienen desde un flujómetro ubicado en la alimentación de la etapa de ultrafiltración, considerando que no existe una pérdida de flujo entre ambas etapas se considera un dato válido para ser analizado.

De estos resultados podemos concluir que existe un caudal promedio bajo lo recomendado para el modelo de filtro TXAA-250, obteniendo valores que fluctúan desde los 98 a 108 m³/h, lo cual podría estar generando los problemas de baja eficiencia en la etapa de pretratamiento.

○ **Test de jarra [ANEXO A]:** De acuerdo con las especificaciones de diseño para la operación de los filtros Turbidex TXAA, se considera una dosificación de 3 a 4,5 mg/l (ppm) de coagulante, correspondiente a un policloruro de aluminio, por lo que se consideran estos parámetros como punto inicial de las Pruebas. Además, con los recursos existentes en faena se logra obtener una cantidad de cloruro férrico, con el cual se realizarán pruebas de jarras en paralelo para contrastar ambos resultados.

La evaluación de una prueba de jarra no se sigue un patrón específico, más que el criterios particular del analista u operario de la planta de acuerdo con su experiencia y conocimiento del tema. Sin embargo, existen ciertas características que se deben tomar en cuenta al momento de realizar el análisis, tales como: las características físicas de los flóculos (tamaño, velocidad de formación de los flóculos, dispersión), la claridad de agua sobre el interfaz y la velocidad de decantación. En el caso de la etapa en estudio, el

objetivo de la prueba es obtener un buen resultado en la coagulación, es decir, lograr un aumento por aglomeración de las partícula, ya que al ser un filtro de presión el agua traspasa el lecho filtrante atrapando las partículas aglomeradas.

Para realizar el ensayo se establecen seis (6) dosis de coagulante, las cuales serán agregadas en un volumen de 500 ml de agua proveniente de la alimentación de la etapa de filtrado. En primera instancia se seleccionan los ensayos de acuerdo con un análisis visual, posteriormente, de los ensayos seleccionados, se realizará una toma de muestra para ser analizada por turbidez.

Identificación y Dosis para Ensayo de Jarras						
Nº muestra	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6
Dosis mg/l	3	4	5	6	7	8

TABLA 4.10 IDENTIFICACIÓN Y DOSIS PARA ENSAYO DE JARRAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Del ensayo realizado se despliega la siguiente tabla, de la cual, se asigna un puntaje de uno (1) a seis (6), con el propósito de seleccionar el o los mejores desempeños en la prueba:

Selección Coagulante y Dosis			
Nº	Dosis mg/l	Policloruro Aluminio	Cloruro Férrico
M-1	3	1	3
M-2	4	1	3
M-3	5	2	4
M-4	6	2	6
M-5	7	3	6
M-6	8	4	5

TABLA 4.11 SELECCIÓN DE COAGULANTE Y DOSIS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

De los ensayos de jarra se obtienen dos (2) pruebas en las que se logra una adecuada coagulación, conforme a la apreciación visual del equipo. Las pruebas M-4 y M-5 alcanzan una puntuación de seis (6), presentando durante el ensayo una rápida reacción en la aglomeración de partículas y un mejor tamaño de estos.

A continuación, se efectúa un análisis de turbidez de las muestras seleccionadas, la cual entrega los datos concluyentes del ensayo.

Resultados de turbidez:

Ensayos Seleccionados para Dosificación de Coagulante							
M-4				M-5			
Visual		Cualitativa		Visual		Cualitativa	
Formación	4	NTU	0,45	Formación	4	NTU	0,55
Tamaño	4	Tiempo	63 s	Tamaño	4	Tiempo	45 s
	8				8		

TABLA 4.12 ENSAYOS SELECCIONADOS PARA DOSIFICACIÓN DE COAGULANTE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

De los resultados obtenidos, se aprecia un mejor rendimiento en la evaluación cualitativa en la muestra M-4 con resultado de 0,45 NTU, no obstante, en cuanto al tiempo de

reacción, la muestra M-5 logra mejores resultados, logrando 45 segundos, siendo ambos factores determinantes en la etapa de coagulación, en conjunto, se determina realizar un último ensayo con una dosis intermedia entre M-4 y M-5, lo que corresponde a 6,5 mg/l, para evaluar resultados.

De lo que se obtiene lo siguiente:

Ensayo extra para Selección de dosificación de coagulante			
M-7 (6,5 mg/l)			
Visual		Cualitativa	
Formación	4	NTU	0,35
Tamaño	4	Tiempo	53 s
	8		

TABLA 4.13 ENSAYO EXTRA PARA SELECCIÓN DE DOSIFICACIÓN DE COAGULANTE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Con este último ensayo se obtiene un resultado equilibrado en cuanto a tiempo, pero más eficiente en cuanto a la separación de partículas con el agua clara, obteniendo una turbidez de 0,35, más bajo que lo mostrado en los ensayos seleccionados anteriormente.

De acuerdo con los resultados obtenidos durante los ensayos, en general, se puede deducir que la dosis de coagulante utilizada actualmente en la etapa de filtros no tiene un buen desempeño, ya que, en los rangos de diseño recomendados, no existe, a modo visual una reacción en la aglomeración de partículas, por lo cual es necesario efectuar ensayos con dosificaciones más altas, con el fin de detectar el punto óptimo de dosis del químico. Por otra parte, los ensayos con cloruro férrico muestran una mejor performance, desde las dosis más bajas, con un rendimiento óptimo en el ensayo con 6,5 mg/l (M-7).

Con esta información se sugiere al área de operaciones la ejecución de pruebas funcionales, tomando en consideración que las propiedades físicas y químicas de ambos coagulantes son compatibles para el proceso de clarificación de aguas.

○ **Medición de volumen e Inspección visual del estado de carga:** es una inspección que consiste en la verificación de la cantidad de carga que posee el filtro, que radica en la comparación de la medida registrada al momento de realizar una carga nueva y la medida obtenida en la inspección. Con esta tarea es posible detectar una pérdida del lecho filtrante, que podría ser ocasionado por una rotura en los colectores de agua filtrada, que son a su vez, el soporte de esta misma. Esta pérdida de carga causa la canalización del flujo de agua, teniendo un paso libre desde el ingreso hasta la descarga del filtro, evitando la retención de partículas en su interior.

Debido a la complejidad de esta tarea en cuanto a tiempo de ejecución y disponibilidad de recurso humano, el desarrollo de la actividad quedará en espera, con estado pendiente hasta contar con los recursos necesarios y disponibilidad de equipo.

➤ **Propuesta de plan de acción**

Con la finalización de los análisis y conclusiones de las posibles causa raíz en la baja eficiencia de la etapa de pretratamiento, se destacan las siguientes soluciones como propuesta al plan de acción, las cuales serán implementadas de forma individual, con el fin de medir de manera cuantitativa el impacto en el proceso.

Las soluciones se detallan a continuación:

- **Ajuste de la cantidad de filtros en servicio**, la implementación de esta medida no requiere de un uso de recursos adicionales, consiste en mantener una operación estable en cuanto al caudal de alimentación y dosificación de químicos, consiste en ajustar el paso del flujo de agua por medio del filtro, este valor debe estar entre los 142,4 y 240 m^3/h por cada filtro en servicio.

Objetivo operar los equipos en los rangos de caudal de diseño entregados por el fabricante, con el fin de obtener una disminución de los parámetros de NTU y TSS.

Alcances y limitaciones Para medir los resultados de esta implementación se realiza una toma de muestra con el siguiente detalle:

- Indicador: NTU – TSS.
- Período: 7 (siete) días.
- Frecuencia: 2 (dos) horas.
- Punto de muestreo: Alimentación y Descarga de filtros TXAA.

Con los resultados obtenidos en esta medición, se obtendrá la capacidad de retención, que, será comparado con los resultados analizados en el levantamiento del proceso.

- **Dosificación de $FeCl_3$ en una dosis de 6,5 mg/l**, consiste en inyectar un coagulante diferente al utilizado actualmente en el proceso, para implementar esta medida se requiere de la instalación de un depósito de almacenamiento provisorio con un arranque desde su descarga hasta el punto de alimentación de las bombas dosificadoras.

Para la inyección del químico se utilizarán los equipos que ya están siendo usados para esta función, en cuanto a la dosis, se adiciona la cantidad definida en la prueba de jarra.

Objetivo dosificar 6,5 mg/l de coagulante cloruro férrico en una concentración de 1000 gr/kg, con el fin de obtener una disminución en los parámetros de NTU y TSS.

Alcances y limitaciones al igual que la implementación anterior la medición de los resultados se realizará de acuerdo con lo siguiente:

- Indicador: NTU – TSS.
- Período: 7 (siete) días.
- Frecuencia: 2 (dos) horas.
- Punto de muestreo: Alimentación y Descarga de filtros TXAA.

La implementación de ambas acciones se llevará a cabo en un período de 14 días, de una a la vez, si durante el primer período de prueba se observa un comportamiento estable y mejorado con respecto al análisis del estado actual del proceso, en el siguiente período será incorporado o adicionado el segundo plan de acción, de lo contrario serán evaluadas individualmente en distintos escenarios.

4.2.2 Do (hacer)

4.2.2.1 Implementación 1 (Ajuste de la cantidad de filtros en servicio)

Para la ejecución del plan de acción, el área de operaciones dispone de un período de 14 días, en los cuales serán aplicadas las mejoras seleccionadas. Se consideran los requisitos establecidos en la etapa de medición y análisis del proceso.

- Mantener un flujo estable de alimentación hacia etapa de osmosis inversa, para este caso cinco (5) módulos en operación más uno (1) en reserva, para mantener continuidad en caso de detención imprevista de algún módulo que se encuentre en servicio. Flujo 620 m³/h.
- Mantener estabilidad en la dosificación de los químicos utilizados en el acondicionamiento del agua de mar en las etapas de pretratamiento, este flujo de inyección será de acuerdo con los parámetros de diseño de los equipos. Como agente coagulante se utiliza CLARISOL 5200 (nombre comercial) cuya composición química es Complejo de Policloruro de Aluminio y Amonios Cuaternarios, la dosificación de diseño es 3 mg/l.

Bajo estos parámetros de operación se procede a realizar la modificación en la operación de los filtros TXXA.

- **Disminución de la cantidad de filtros en servicio.**

Para un flujo de 620 m³/h. actualmente se encuentran en servicio 6 (seis) filtros los que da como promedio un caudal de 103,3 m³/h. por filtro, equivalente a un 26,4% menos del flujo mínimo requerido para obtener un desempeño óptimo de la etapa de filtrado.

Al calcular la cantidad de filtros en operación para el caudal promedio de 620 m³/h, de acuerdo con la ficha técnica, es recomendado operar con 4 (cuatro) filtros lo que promedia un flujo de 155 m³/h, por cada uno.

En base al cálculo anterior se procede al cierre o aislamiento de 2 (dos) filtros.

- **Observaciones.**

Una vez aislados los filtros los operadores deberán mantener un control de la estabilidad de flujo y presión general al ingreso de la etapa de filtrado, registrando todo evento que presente desviaciones considerables que puedan afectar los resultados de la prueba.

Se inicia la toma de muestras y posterior análisis de acuerdo con lo detallado en el Plan de Acción.

4.2.3 Check (verificar)

4.2.3.1 Análisis y comparación de resultados de implementación 1

El indicador clave para la evaluación del comportamiento y desempeño de la etapa de filtrado es la capacidad de retención, al igual que en la medición y análisis del proceso, este indicador se obtendrá de la aplicación de la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Retención} = \frac{\text{turb } i - \text{turb } f}{\text{turb } i} \times 100\%$$

Por lo que se analiza de manera simultánea la Turbidez en la alimentación y en la descarga de la etapa de filtrado [Ver Anexo 6: Datos de medición de Turbidez de alimentación y descarga de Prefiltrado en Primera Implementación de Mejora]. Con los datos obtenidos y una vez aplicada la fórmula para el cálculo del porcentaje de retención [Ver Anexo 7: Resultado de porcentaje de retención en Primera Implementación de Mejora], se representas los resultados en la siguiente grafica de control:

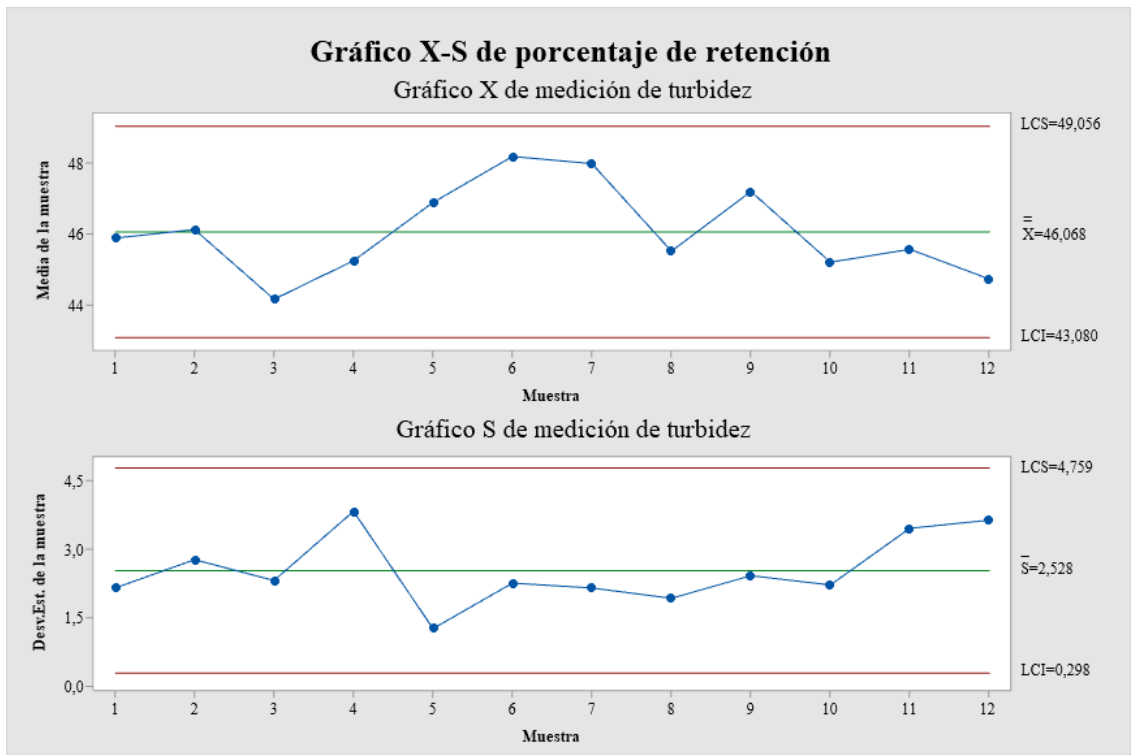


figura 4.9 Grafico de control porcentaje de retención. Fuente: Elaboración propia

Conforme a los resultados conseguidos en la representación gráfica, se puede observar que el comportamiento de las medias se encuentra dentro de los límites de control, indicando estabilidad durante la etapa de implementación de la prueba. Además, presenta un aumento del 37,8% de la media en la capacidad de retención, llevando de un 33,42% a un 46,06% dicho indicador, de acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis inicial del estado del proceso.

En cuanto a la desviación estándar, la gráfica S confirma la estabilidad del proceso con todos los puntos dentro de los límites de control.

4.2.4 Act (actuar)

4.2.4.1 Registro de cambios de implementación 1

Con la implementación de la primera etapa del plan de acción se puede concluir que dicho ajuste mejoró el desempeño de la etapa de filtrado aumentando un 37,8% la capacidad de retención, alcanzando el 46,06% de su nivel óptimo. Sin embargo, este incremento no es suficiente para alcanzar la capacidad óptima de retención, recordando que es un 75% mínimo para este tipo de proceso.

Para realizar los cambios necesarios en la implementación definitiva de la mejora propuesta, se solicita al departamento “DCS” (Data Control System), realizar e implementar el algoritmo en la lógica de control, de acuerdo con los rangos óptimos de operación ($142,4 \text{ m}^3/h - 240,5 \text{ m}^3/h$) la cual permitirá seleccionar de manera automática la cantidad de filtros necesarios para un caudal determinado por el flujómetro de alimentación a la planta. A su vez, esta implementación será registrada y aplicada en los procedimientos de puesta en servicio y operación de dicha etapa, para ser aplicados en caso de la operación manual del proceso.

Con este último proceso se finaliza la implementación de la primera parte del plan de acción para la optimización del proceso de pretratamiento en la etapa de filtrado, correspondiente al ajuste de cantidad de filtros en servicio.

A continuación, y una vez finalizados los preparativos para la dosificación de cloruro férrico como coagulante, se procede a la implementación de la segunda propuesta de mejora.

4.2.5 Do (hacer)

4.2.5.1 Implementación 2 Dosificación de $FeCl_3$ en una dosis de 6,5 mg/l

Debido a los buenos resultados conseguidos en la implementación anterior, se inicia el proceso de puesta en servicio de la dosificación de cloruro férrico como medio coagulante en la etapa de filtrado, conforme a los siguientes parámetros de operación:

- Mantener un flujo estable de alimentación hacia etapa de osmosis inversa, para este caso cinco (5) módulos en operación más uno (1) en reserva, para mantener continuidad en caso de detención imprevista de algún módulo que se encuentre en servicio. Flujo 620 m³/h.
- Filtros en servicio: 4 filtros con un flujo unitario de 155 m³/h aprox.
- Mantener estabilidad en la dosificación de los químicos utilizados en el acondicionamiento del agua de mar en las etapas de pretratamiento, de acuerdo con la dosis de mejor rendimiento obtenidos en los ensayos de jarra, correspondiente **6,5 mg/l** de coagulante **$FeCl_3$** .

Bajo estos parámetros se procede a realizar el cambio de producto en la dosificación de coagulante.

- **Dosificación de $FeCl_3$ en una dosis de 6,5 mg/l.**

Para iniciar la dosificación de **$FeCl_3$** , se procede de la siguiente manera:

- Detención y bloqueo operacional de las bombas dosificadoras.
- Desconexión de línea de descarga de bombas en punto de inyección.
- Desconexión de línea en el punto de alimentación de bombas.
- Conexión de línea de agua en el punto de alimentación de bombas.
- Desbloqueo de bombas dosificadoras y puesta en servicio.
- Limpieza de bombas y línea de descarga de bombas hasta punto de inyección.
- Detención y bloqueo de bombas dosificadoras.
- Desconexión de línea de agua en el punto de alimentación de bombas.
- Conexión de línea con **$FeCl_3$** en punto de alimentación de bombas.
- Apertura de válvula de descarga de estanque de almacenamiento de **$FeCl_3$** .
- Desbloqueo y puesta en servicio de bombas dosificadoras.
- Llenado de líneas de succión y descarga de bombas, cebado de bombas.
- Detención y bloqueo de bombas dosificadoras.
- Conexión en línea de descarga de bombas en punto de inyección.
- Desbloqueo y puesta en servicio de bombas.

Con el sistema de dosificación en servicio se ajusta y verifica la dosis de producto requerido para la prueba, realizando un aforo de las bombas dosificadoras, una vez realizados los ajustes necesarios se inicia la prueba.

○ **Observaciones.**

Durante el período de prueba los operadores encargados de controlar y medir el proceso deberán verificar y corregir en caso de ser necesario el funcionamiento de las bombas dosificadoras. Además, llevar un registro de consumo diario del producto, informando de manera oportuna un nivel crítico que pueda comprometer la ejecución de la prueba.

Ante cualquier alteración aguas abajo del proceso específicamente en la etapa de ultrafiltración, por indicaciones explícitas del área de operaciones, la prueba se suspende de manera inmediata.

Teniendo en cuenta las consideraciones antes mencionadas, se inicia la medición del proceso.

4.2.6 Check (verificar)

4.2.6.1 Análisis y comparación de resultados de implementación 2

Al igual que el ciclo anterior el indicador clave para dar seguimiento a todo el proceso es la capacidad de retención de la etapa de filtrado. De esta manera, al obtener los resultados de esta implementación, se podrá contrastar y medir el avance de las propuestas ejecutadas.

Cada medición incluye dos muestras correspondientes a la alimentación del filtro y la descarga de este mismo [Ver Anexo 8: Datos de medición de Turbidez de alimentación y descarga de Prefiltrado en Segunda Implementación de Mejora], de ambos resultados se obtiene el porcentaje de la capacidad de retención [Ver Anexo 9: Resultado de porcentaje de retención en Primera Implementación de Mejora], los cuales se representan en la gráfica de control de la siguiente manera:

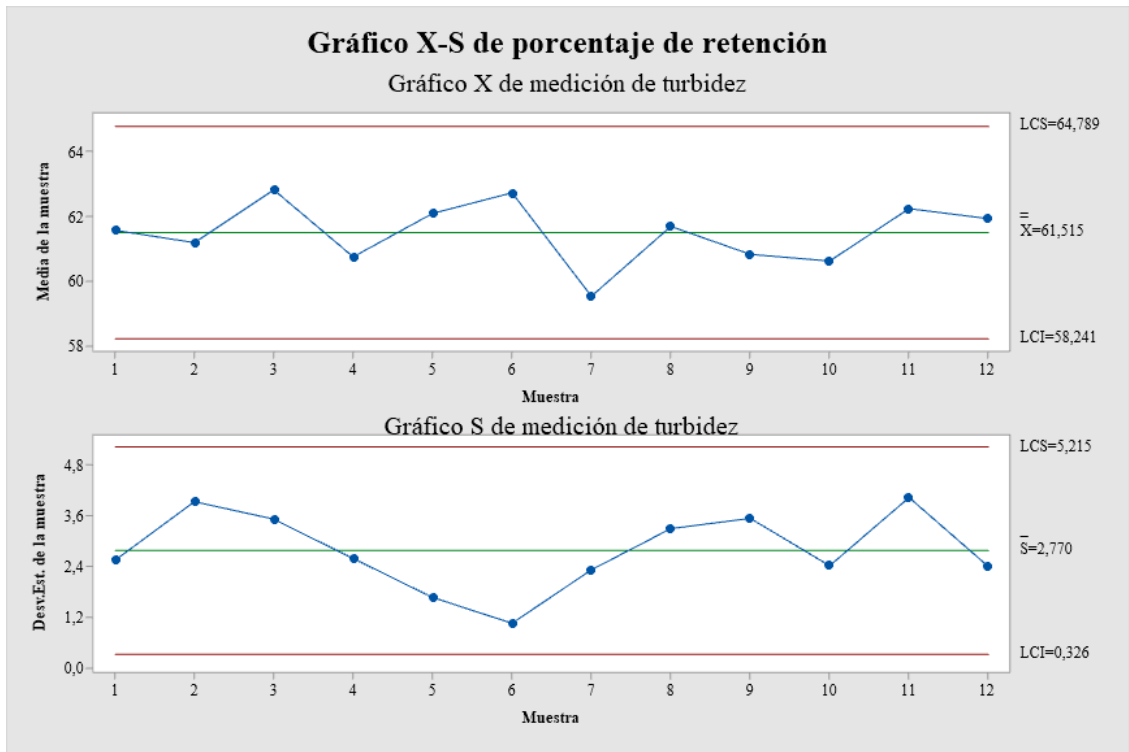


figura 4.10 Grafico de control porcentaje de retención mejora. Fuente: Elaboración propia

La gráfica de control indica una variabilidad de las medias estable, dentro de los límites de control, con una media promedio en la capacidad de retención de 61,5%. A su vez, el comportamiento de la desviación estándar confirma dicha estabilidad con todos los puntos dentro de los límites de control.

4.2.7 Act (actuar)

4.2.7.1 Registro de cambios de implementación 2

Tal como se evidenció en el ensayo de laboratorio o test de jarra, el comportamiento del coagulante seleccionado demuestra un mejor desempeño en la aglomeración de partículas coloidales los que se ve reflejado en la medición de turbidez de descarga del agua tratada. Con la dosificación de **FeCl₃** como medio de coagulación, se logra alcanzar un retención promedio de 61,5% incrementado en un 33,5% desde su medición anterior. Sin embargo, el promedio alcanzado aún presenta un déficit de 21,9% para conseguir su desempeño óptimo.

Dado que los resultados obtenidos en la aplicación del coagulante **FeCl₃**, ajustan de mejor manera el desempeño de los filtros TXAA, se prolonga el uso del coagulante por un período de 30 días, en los cuáles se realizarán otras mediciones de interés. El uso de este químico requiere un seguimiento estricto en cuanto a su dosificación ya que un exceso de producto puede ocasionar daños acumulativos en otros equipos asociados a la operación, debido a esto es necesario realizar test de jarra de forma habitual, o cuando exista alguna variación en la calidad de agua de alimentación. Para esto se generan parámetros que puedan mejorar los criterios en la toma de decisiones ante un eventual ajuste en la dosificación.

4.3 Resultados Generales

Con la aplicación de una metodología sistémica enfocada en solución de problemas, y sumado al uso de herramientas de calidad, se logra identificar y desarrollar un plan de acción que permite al área de operaciones mitigar el impacto provocado por el bajo rendimiento de una de las etapas de pretratamiento de la planta de osmosis inversa. Con pequeñas acciones y sin incurrir en altos costos, las acciones aplicadas presentan mejoras que, en el corto plazo, aumentaron el desempeño en un 84% respecto del valor inicial, alcanzando una capacidad de retención promedio del 61,5% en la etapa de filtrado. Sin embargo, alcanzar el nivel deseado del 80%, requiere de una intervención de mayor complejidad, pero alcanzable en un mediano plazo, considerando los beneficios que estos generarían para el proceso.

4.4 Validación de Resultados

4.4.1 Introducción

La validación de resultados es una etapa crítica en la metodología PDCA, ya que permite verificar la efectividad de las mejoras implementadas en el proceso y a su vez confirmar que los objetivos del proyecto se han alcanzado. Además, en esta sección se describen los métodos empleados para validar los resultados obtenidos y los indicadores clave de desempeño que se han evaluado.

4.4.2 Metodología de Validación

Para validar los resultados, se han utilizado las siguientes metodologías y herramientas:

- **Análisis Comparativo:** Se desarrolla en base a los resultados obtenidos en la medición de desempeño en el estado actual del proceso y en las mediciones obtenidas posterior a la implementación de las mejoras.
- **Indicadores de Desempeño:** Medición de indicadores clave, tales como, eficiencia del proceso, calidad del agua de alimentación a la OI y los costos operacionales.
- **Encuestas y Retroalimentación:** Recopilación de retroalimentación de los operadores de planta y stakeholders relevantes, durante el proceso de implementación.

4.4.3 Indicadores de Desempeño:

Se han definido los siguientes indicadores clave de desempeño (KPI), para la evaluación de las mejoras implementadas en el proceso:

- **Eficiencia del Proceso:** El aumento en la eficiencia del proceso será medido y evaluado en base a la disminución en la frecuencia de lavados químicos en la etapa de ósmosis inversa.
- **Calidad del Agua de Alimentación a la OI:** Para medir la calidad del agua de alimentación se utilizará la reducción del índice de saturación (SDI) y la reducción del parámetro de sólidos suspendidos totales (TSS).
- **Costos Operacionales:** Será medido en la reducción porcentual de los costos de insumos químicos utilizados en los lavados.

4.4.4 Resultados de la Validación

A continuación, se exponen los resultados de la validación:

○ **Eficiencia del Proceso:**

Se evalúan los 3 meses críticos de mayor cantidad de detenciones por lavados químicos, de lo que se obtiene el siguiente comparativo:

- Frecuencia de lavado químico antes: 1 mes.
- Frecuencia de lavados químico después: 2 meses.

Con estos resultados, la eficiencia del proceso tuvo un incremento del 50%.

○ **Calidad de Agua de Alimentación a la OI:**

Las mediciones de SDI y TSS presentan reducción en sus resultados posterior a la implementación de las mejoras, las cuales se muestran de la siguiente forma:

Indicador	Resultado Anterior	Resultado Posterior	Porcentaje de Reducción
SDI	3,83	3,17	17,23
TSS	17,92	10,28	42,63

TABLA 4.14 DIFERENCIA DE RESULTADOS DE SDI Y TSS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

○ **Costos Operacionales:**

Los costos operacionales son referenciales al gasto de insumos para realizar lavados químicos en los módulos de OI, estos fueron calculados en el período de un año, de lo que se obtiene el siguiente resultado:

Costos Asociados a Lavados de Osmosis Inversa			
Producto Químico	Costo lavado imprevisto	Costo lavado condiciones Normales	Diferencia
Genesol 37	\$57.552	\$20.928	\$36.624
Genesol 704	\$60.391	\$21.552	\$38.839
Total	\$117.943	\$42.480	
Diferencia de Costos			\$75.463

TABLA 4.15 COSTOS ASOCIADOS A LAVADOS ANTES DE IMPLEMENTACIÓN DE MEJORAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Costos Asociados a Lavados de Osmosis Inversa			
Producto Químico	Costo lavado imprevisto	Costo lavado condiciones Normales	Diferencia
Genesol 37	\$34.226	\$20.928	\$13.298
Genesol 704	\$35.247	\$21.552	\$13.695
Total	\$69.473	\$42.480	
Diferencia de Costos			\$26.993

TABLA 4.16 COSTOS ASOCIADOS A LAVADOS POSTERIOR A IMPLEMENTACIÓN DE MEJORAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Antes de la mejora los costos alcanzaban los US\$117.943, posterior a la implementación de la mejora, proyectando el último mes al consumo más alto obtenido es de US\$69.473, logrando una reducción del 41,1%.

4.4.5 Análisis de Resultados

El análisis de los resultados demuestra que las mejoras implementadas han generado un impacto significativo en el desempeño del proceso, logrando reducir significativamente los costos operacionales, reduciendo la frecuencia de los lavados químicos en la etapa de osmosis inversa debido a la mejora en la calidad de agua de alimentación proveniente de la etapa de pretratamiento.

4.5 Limitaciones del Estudio y Trabajos Futuros

4.5.1 Conclusiones y Recomendaciones

En conclusión, la validación de resultados ha demostrado que las mejoras implementadas en el proceso han cumplido en gran parte los objetivos del proyecto, logrando una notable mejora en el rendimiento de la etapa de filtrado. Sin embargo, la frecuencia de lavados permanece en una condición fuera de lo recomendado por los fabricantes de membranas de osmosis inversa, lo que implica evaluar y realizar nuevos estudios que permitan alcanzar el nivel máximo de eficiencia de la planta.

En cuanto a las recomendaciones, dentro de las observaciones documentadas durante la implementación de las mejoras, existen 3 (tres) factores que podrían incidir en los resultados esperados para el proceso, los cuales requieren de un grado de complejidad y costos de ejecución más altos, pero alcanzables en un mediano plazo.

- **Mejorar la homogenización:** evaluar la factibilidad de implementar un sistema de mezclador estático, el cual cumple la función de generar turbulencias en el flujo de agua al pasar por este punto, mejorando la mezcla del químico al contacto con el agua.

Ejemplo:

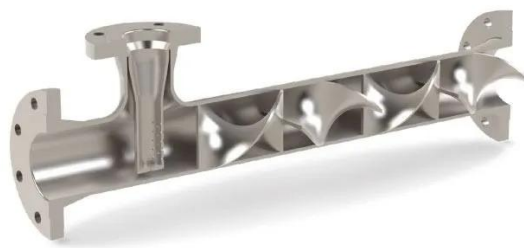


figura 4.11 Mezclador estático. Fuente: primix.com/products

- **Alejar el Punto de Inyección:** Ya que el mezclador estático cuenta con un puerto de inyección, se debe evaluar que la instalación de este sistema sea ubicada en un punto más lejano al ingreso del agua hacia los filtros, debido a que actualmente el punto de inyección se encuentra solo a 2 metros de distancia del primer filtro, limitando el tiempo de residencia requerido para una buena homogenización.
- **Estado de Lecho Filtrante:** Dentro del plan de acción se contempla la apertura de los filtros, con el fin de visualizar el estado y la medida del volumen de la carga de lecho filtrante en su interior, debido a la falta de recursos, tanto humanos como materiales la actividad queda en estado pendiente, se debe evaluar y planificar su ejecución de tal manera que no afecte la producción ni la calidad del agua producto.

4.5.2 Introducción

Reconocer las limitaciones del estudio es fundamental para una evaluación crítica del trabajo realizado. La identificación de estas limitaciones permite comprender de mejor forma el alcance y las restricciones del proyecto de igual manera la identificación de las áreas de mejora para futuras investigaciones.

4.5.3 Limitaciones del Estudio

Metodológicos

- **Disponibilidad de Datos:** Un buen diagnóstico de proceso depende en gran medida del manejo y la rigurosidad en la obtención de datos, además de una buena selección de los parámetros clave para el control de este. Para el caso en estudio, los datos de consumos y costos de insumos mantienen un orden y un control claro. No obstante, los datos provenientes de los controles del proceso resultaron incompletos, por no estar definido en el procedimiento o simplemente no haber sido considerado como parámetro crítico dentro de la ruta de control. Si bien, lo anterior afectó el desarrollo de la elaboración del diagnóstico, para el área de operaciones tuvo un impacto mayor, respecto a operar de manera reactiva en el proceso.
- **Limitaciones en el Muestreo:** Basado en el punto anterior, el no contar con datos de parámetros críticos para el proceso, provocó una limitación debido a que el diagnóstico se realizó en un período acotado de tiempo, en condiciones climáticas estables, dejando interrogantes en el comportamiento del proceso durante las otras estaciones del año.

Tecnológicas

- **Falta de Certificación de Equipos:** El proceso de osmosis inversa requiere de un control estricto de parámetros, que en ocasiones debe realizarse con mediciones in situ, por lo cual es necesario contar con equipos portátiles multiparámetros que permitan obtener estos resultados y a su vez contrastar la instrumentación en línea del proceso. Una de las limitaciones del estudio recae en la falta de certificación o registro de calibración de estos, lo que pudo haber afectado en la veracidad de los datos.
- **Monitoreo en Tiempo Real:** El control de proceso es un aspecto crítico para mantener la calidad y el buen rendimiento en el tratamiento de aguas por osmosis inversa. A pesar de contar con instrumentación para el seguimiento de parámetros, el monitoreo en línea está solamente implementado en la etapa de ultrafiltración y osmosis inversa, dejando la etapa de filtrado solo con el monitoreo de instrumentación en terreno debido a la incompatibilidad del programa de control, lo que obligó a un mayor uso de recursos y a una tardía reacción en la ejecución de ajustes en el proceso de implementación y validación.

- **Automatización:** La etapa de filtros cuenta con un sistema que permite su operación en Modo Manual y Modo Automático. Actualmente la operación en Modo Automático presenta una falla de compatibilidad en los equipos utilizados para su funcionamiento y el programa de control, lo que obliga a operar en Modo Manual todo el sistema, realizando chequeos de dosificación y ajustes de manera frecuente, lo que en algunas ocasiones provocó variaciones en la dosificación durante el período de implementación.

Tiempo

- **Plazo del Proyecto:** El tiempo asignado para la ejecución del proyecto fue acotado, lo que limitó la capacidad del estudio para evaluar la eficiencia del proceso en otros escenarios climatológicos.

Recursos

- **Personal Especializado:** Pese que, a contar con operadores con experiencia en el proceso de osmosis inversa, el bajo conocimiento en química básica limitó el estudio en cuanto al tiempo y precisión en los ajustes requeridos.

4.5.4 Posibles Trabajos Futuros

Período de Estudio

- **Muestreo Extendido:** Debido a los cambios físico-químicos en el agua de mar producto de la temperatura, demanda de oxígeno, aumento de la actividad biológica y las corrientes marinas que se presentan durante el año, es imperativo realizar estudios de muestreo y análisis de parámetros de la calidad de agua de alimentación al proceso en períodos más extensos de tiempo necesariamente que involucren las diferentes estaciones del año, con el fin de obtener una percepción transversal respecto a las variaciones del proceso.

Mejoras Tecnológicas

- **Registro de Certificación y Calibración:** La veracidad en los datos proporciona la información exacta para una oportuna y correcta toma de decisiones, debido a esto, es indispensable contar con equipos que otorguen seguridad en los resultados, implementando un control o registro que certifique que el instrumento está en condiciones de ser utilizado tanto para los controles operacionales como para los estudios futuros.
- **Implementación de Monitoreo en Línea:** El monitoreo en línea es una parte fundamental para mantener una operación estable y controlada, con la supervisión del comportamiento de indicadores críticos se puede anticipar y prevenir ciertas variaciones no deseadas en el proceso, mejorando la capacidad de respuesta ante estos

acontecimientos. Además de generar datos históricos que contribuyan a estudios futuros del proceso.

Ampliación del Alcance de Estudio

- **Comparación de Tecnologías y Métodos:** El diseño y construcción de una planta desaladora se realiza en base a las características fisicoquímicas del agua a tratar y a los requisitos en el uso del agua producto, por lo que, cada planta requiere de un estudio en profundidad al momento de seleccionar los equipos y tecnologías para su implementación. Sin embargo, realizar estudios comparativos entre diferentes tecnologías y métodos de desalación para uso industrial, ofrece variadas alternativas al momento de evaluar la implementación de mejoras.
- **Impacto Ambiental:** Realizar estudios sobre el impacto ambiental que los procesos de desalación por ósmosis inversa ocasionan, en cuanto a la generación de RILES y subproductos de estos, con el propósito de reducir el efecto negativo y contribuir a un desarrollo más amigable de la actividad,

Desarrollo Profesional y Recursos Humanos

- **Desarrollo Profesional:** Elaborar un programa de capacitaciones que permitan aumentar los conocimientos y competencias del personal de operaciones, con el fin de incentivar la contribución al crecimiento del negocio y al desarrollo individual de cada integrante del equipo.
- **Personal Especializado:** Considerar el aumento de la dotación de operadores que cuenten con la especialización en química, con el propósito de liderar, desarrollar e implementar métodos de mayor rigurosidad para un plan de muestreo y análisis del proceso.

5 **BIBLIOGRAFÍA**

- Redacción APD. ¿Cómo medir si tu empresa es competitiva?: Medir la competitividad en 5 pasos [en línea]. Comunidad Global de Directivos, 2019, estrategias de crecimiento. <www.apd.es/medir-la-competitividad-empresa-claves>. [consulta: 10 de enero de 2023]
- Verdugo, S. Estudios de consumo de agua y electricidad en la minería del cobre [en línea]. COCHILCO, 2024, publicaciones. <www.cochilco.cl/web/cochilco-presento-los-estudios-de-consumo-de-agua-y-electricidad-en-la-mineria-del-cobre>. [consulta: 20 de enero de 2023]
- Viera, M. Los nuevos escenarios y desafíos que enfrenta la minería chilena [en línea]. Portal Minero, 2022, columna de opinión. <www.portalminero.com/wp/los-nuevos-escenarios-y-desafios-que-enfrenta-la-mineria-chilena>. [consulta: 20 de enero de 2023]
- Betancourt, D. F. Ciclo de Deming (PDCA): Qué es y cómo logra la mejora continua [en línea]. Ingenio Empresa, 2018. <www.ingenioempresa.com/ciclo-pdca>. [consulta: 05 de febrero de 2023]
- McNeese, B. Las siete herramientas de calidad del Dr. Ishikawa [en línea]. SPC for Excel, 2017, base de conocimientos. <www.spcforexcel.com/knowledge/process-improvement/ishikawa-seven-quality-tools>. [consulta: 15 de febrero de 2023]

6 **ANEXOS**

ANEXO A: GLOSARIO TÉCNICO

Coloides:	Son partículas diminutas, de tamaño intermedio entre las diluciones y las suspensiones generalmente entre 1 y 1000 nanómetros.
Turbidex:	Es un medio filtrante de zeolita de alto rendimiento, es utilizado para la eliminación de sólidos en suspensión en proceso de clarificación de aguas.
Clarisol 5200:	Nombre comercial de coagulante, cuya composición química es Complejo de Policloruro de Aluminio y Amonios Cuaternarios.
Test de jarra:	Es una prueba que determina el mejor punto de eficiencia de un coagulante o floculante en la aglomeración de partículas coloidales en una muestra de agua, simulando un estado a escala del proceso con diferentes dosificaciones de un químico.
Coagulación:	Es un proceso químico clave en el tratamiento de agua que se utiliza para desestabilizar y agrupar las partículas suspendidas y coloidales que causan la turbidez y que no se asientan por sí solas.
Floculación:	Es un proceso físico que sigue inmediatamente a la coagulación en el tratamiento de agua. Consiste en una agitación muy lenta y suave que busca que los micro flóculos ya desestabilizados choquen entre sí, se aglomeren y formen partículas más grandes y pesadas llamadas Macro flóculos, facilitando así su posterior sedimentación o filtración.
Decantación:	Es el proceso físico que sigue a la floculación. Su objetivo principal es separar por gravedad los macro flóculos más densos del agua, permitiendo que caigan al fondo del tanque en forma de lodos y dejando el agua clarificada en la superficie.

Anexo 1: Diagrama de Gantt



Anexo 2: Datos de medición de SDI.

Medición de SDI												
Fecha	Horario de Medición											
	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00	22:00	0:00	2:00	4:00	6:00
15-03-2023	3,51	2,97	2,91	3,05	3,4	2,98	3,29	3,19	3,55	3,4	3,53	3,02
16-03-2023	3,15	3,34	2,82	2,94	3,11	2,86	3,31	2,96	3,52	3,01	3,31	3,07
17-03-2023	3,12	3,14	3,03	3,35	2,97	2,99	3,16	3,17	3,23	3,09	3,26	3,23
18-03-2023	3,37	3,03	3,11	2,99	3,14	3,07	3,33	3,45	3,33	3,55	3,59	3,53
19-03-2023	3,15	2,87	2,85	2,89	2,92	2,93	3,23	3,16	3,48	3,43	3,6	3,18
20-03-2023	3,13	3,01	3,15	3,1	3,23	3,04	3,11	3,24	3,09	3,1	3,17	3,33
21-03-2023	2,93	2,88	2,79	2,75	2,77	2,98	3,02	3,24	3,13	3,17	3,23	3,52
22-03-2023	3,25	3,55	3,34	3,42	3,37	3,45	3,13	3,04	3,17	2,98	3,14	2,83
23-03-2023	3,15	2,86	3,04	3,07	3,01	2,96	3,13	3,25	3,21	3,31	3,18	3,16
24-03-2023	3,25	3,01	3,03	2,91	3,04	2,99	3,2	3,41	3,33	3,39	3,46	3,26
25-03-2023	3,19	3,37	3,29	3,23	3,11	3,31	3,17	3,39	3,25	3,28	3,32	3,41
26-03-2023	3,2	3,5	3,41	3,38	3,23	3,33	3,25	3,29	3,28	3,28	3,35	3,24
27-03-2023	3,11	3,19	3,24	3,13	3,16	3,21	3,09	3,01	3,05	3,19	3,1	3,09
28-03-2023	2,97	3	2,93	3,03	3,05	2,99	3,05	3,17	2,95	3,14	3,07	3,12

Anexo 2: Datos de medición de Turbidez de alimentación y descarga de Prefiltrado.

Medición de Turbidez en Alimentación de Prefiltrado												
Fecha	Horario de Medición											
	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00	22:00	0:00	2:00	4:00	6:00
15-03-2023	1,47	1,50	1,49	1,57	1,80	1,74	1,56	1,65	1,64	1,72	1,69	1,59
16-03-2023	1,39	1,41	1,45	1,54	1,84	1,72	1,41	1,56	1,59	1,48	1,54	1,24
17-03-2023	1,36	1,34	1,52	1,49	1,67	1,91	1,49	1,52	1,57	1,55	1,61	1,24
18-03-2023	1,52	1,34	1,48	1,39	1,86	1,81	1,46	1,64	1,49	1,46	1,54	1,23
19-03-2023	1,38	1,49	1,61	1,41	1,89	1,83	1,52	1,59	1,53	1,49	1,39	1,22
20-03-2023	1,39	1,36	1,55	1,48	1,90	1,98	1,54	1,41	1,55	1,43	1,47	1,25
21-03-2023	1,40	1,52	1,67	1,51	1,93	2,01	1,69	1,50	1,65	1,56	1,66	1,30
22-03-2023	1,51	1,57	1,61	1,52	1,71	1,61	1,68	1,64	1,54	1,47	1,37	1,30
23-03-2023	1,45	1,43	1,53	1,37	1,63	1,80	1,66	1,57	1,66	1,49	1,47	1,43
24-03-2023	1,45	1,39	1,57	1,42	1,75	2,03	1,48	1,43	1,60	1,53	1,34	1,21
25-03-2023	1,61	1,64	1,69	1,50	1,70	1,78	1,61	1,54	1,62	1,42	1,35	1,20
26-03-2023	1,53	1,43	1,45	1,40	1,72	1,86	1,51	1,41	1,52	1,62	1,49	1,39
27-03-2023	1,55	1,40	1,58	1,34	1,82	1,63	1,50	1,56	1,48	1,35	1,35	1,31
28-03-2023	1,47	1,61	1,74	1,56	1,80	1,65	1,65	1,47	1,67	1,41	1,39	1,20

Medición de Turbidez en Descarga de Prefiltrado												
Fecha	Horario de Medición											
	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00	22:00	0:00	2:00	4:00	6:00
15-03-2023	1,09	0,89	1,10	0,95	1,23	1,17	0,93	0,96	1,05	1,13	1,16	1,03
16-03-2023	1,06	0,92	0,98	1,02	1,19	1,14	0,97	1,03	1,01	1,07	1,10	1,08
17-03-2023	0,89	0,88	1,07	1,05	1,17	1,11	0,88	1,05	1,07	1,11	0,97	0,88
18-03-2023	0,94	0,96	1,11	0,89	1,27	1,15	0,91	0,91	1,09	1,10	1,06	0,91
19-03-2023	1,02	0,89	1,05	0,94	1,15	1,09	0,99	0,94	1,12	1,09	1,04	0,93
20-03-2023	0,91	0,95	0,97	0,96	1,19	1,25	0,97	1,10	1,06	1,15	1,03	0,94
21-03-2023	0,89	0,97	1,04	0,91	1,17	1,19	1,03	1,07	1,12	0,97	0,87	0,86
22-03-2023	1,01	0,95	0,95	0,93	1,13	1,25	1,01	0,93	1,08	0,99	0,96	0,93
23-03-2023	1,05	0,87	0,91	0,98	1,07	1,05	1,07	1,02	1,10	1,00	0,97	0,83
24-03-2023	0,93	0,98	0,94	1,01	1,06	1,21	1,10	1,09	1,04	0,94	0,96	0,92
25-03-2023	0,97	1,01	1,09	1,07	1,29	1,11	1,00	1,12	1,11	1,01	0,83	0,79
26-03-2023	1,03	1,06	0,99	0,99	1,13	1,13	0,97	1,06	1,07	1,02	0,88	0,89
27-03-2023	0,98	1,05	1,04	0,96	1,15	1,21	1,09	1,15	1,05	0,89	0,99	0,86
28-03-2023	0,91	0,91	0,93	0,97	1,08	1,12	1,08	1,09	1,12	1,02	1,07	0,92

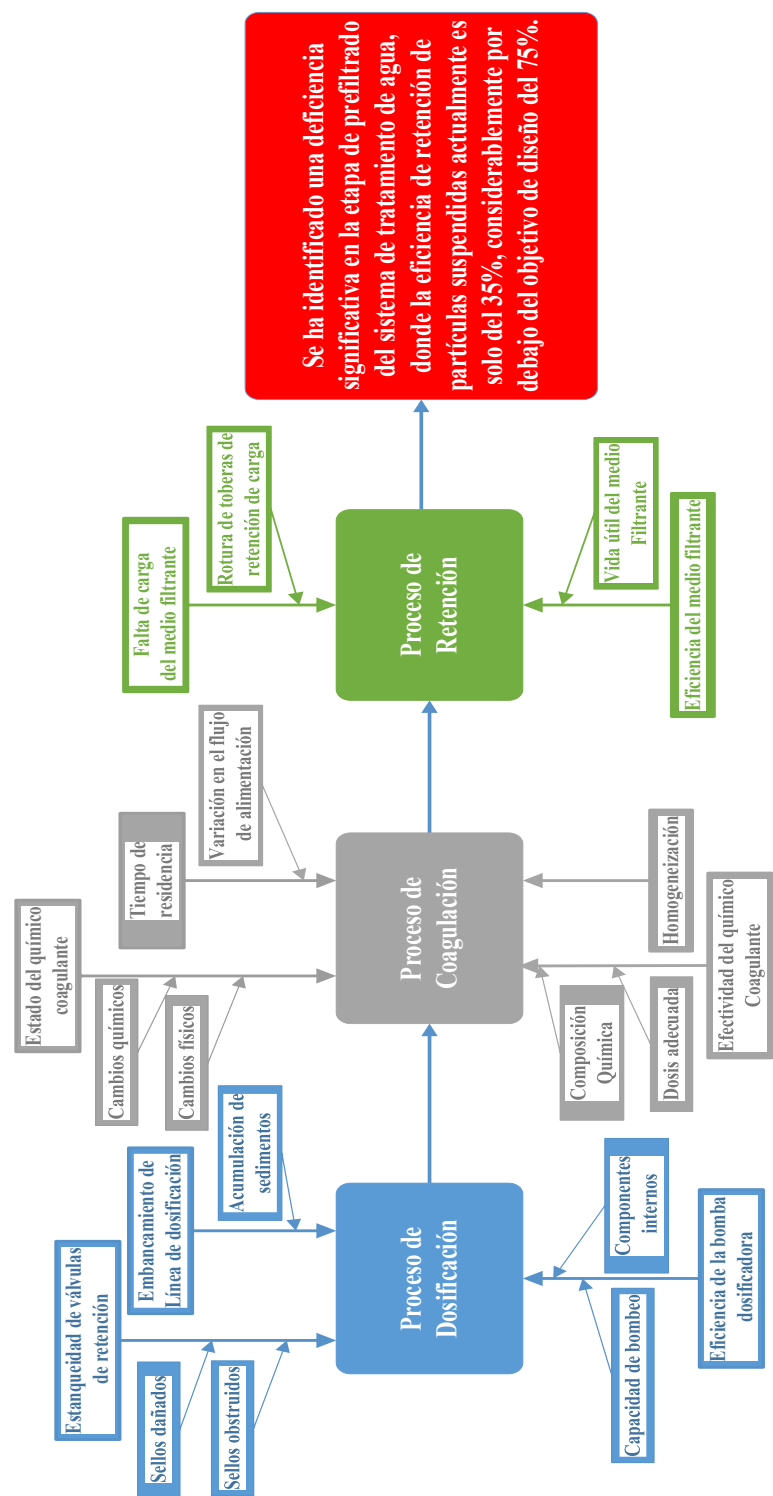
Anexo 3: Tabla de porcentaje de retención Prefiltrado.

Porcentaje de Retención Prefiltrado												
Fecha/hora	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00	22:00	0:00	2:00	4:00	6:00
15-03-2023	25,85	40,67	26,17	39,49	31,83	32,77	40,38	41,82	35,98	34,30	31,36	35,22
16-03-2023	23,74	34,75	32,29	33,82	35,49	33,75	31,30	33,98	36,48	27,70	28,57	12,88
17-03-2023	34,56	34,36	29,61	29,53	30,08	41,88	40,96	30,83	31,85	28,39	39,75	29,12
18-03-2023	38,16	28,56	24,99	35,97	31,69	36,46	37,61	44,56	26,85	24,66	31,17	25,72
19-03-2023	26,09	40,27	34,78	33,30	39,15	40,43	34,71	40,76	26,80	26,85	25,18	23,73
20-03-2023	34,53	30,15	37,37	35,34	37,34	36,87	37,08	22,12	31,61	19,58	29,93	24,80
21-03-2023	36,43	36,18	37,72	39,57	39,38	40,80	38,92	28,58	32,12	37,82	47,59	33,85
22-03-2023	33,11	39,49	40,99	38,97	34,07	22,37	39,72	43,32	29,87	32,65	29,93	28,46
23-03-2023	27,59	39,16	40,52	28,51	34,28	41,78	35,72	34,95	33,73	32,89	34,01	41,96
24-03-2023	35,86	29,50	39,96	28,91	39,39	40,39	25,58	23,78	35,00	38,56	28,36	23,92
25-03-2023	39,75	38,41	35,50	28,56	23,95	37,47	37,95	27,24	31,48	28,87	38,52	34,31
26-03-2023	32,68	25,87	31,63	29,38	34,38	39,30	35,63	24,90	29,61	37,04	40,94	35,97
27-03-2023	36,77	25,00	34,22	28,26	36,94	25,96	27,17	26,31	29,05	34,07	26,67	34,35
28-03-2023	38,10	43,48	46,55	37,73	39,88	32,29	34,68	25,85	32,93	27,66	23,02	23,33

Anexo 4: Medición de SST (Sólidos Suspendidos Totales)

Medición SST (Sólidos Suspendidos Totales)												
Fecha/hora	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00	22:00	0:00	2:00	4:00	6:00
15-03-2023	19	16	17	19	16	17	15	19	19	19	21	22
16-03-2023	17	17	16	17	14	16	14	16	18	18	20	19
17-03-2023	20	18	18	18	16	15	16	20	21	19	20	20
18-03-2023	17	19	15	17	19	14	17	22	16	20	19	19
19-03-2023	21	17	16	19	14	19	14	16	22	18	17	18
20-03-2023	18	18	16	20	15	15	13	18	17	20	21	22
21-03-2023	19	18	17	17	17	14	15	21	19	18	19	18
22-03-2023	20	17	16	19	16	16	18	17	17	21	20	21
23-03-2023	19	20	19	16	18	18	15	18	18	20	20	23
24-03-2023	18	16	17	20	16	16	16	20	22	23	16	18
25-03-2023	19	17	15	16	20	17	17	17	16	17	17	19
26-03-2023	17	19	14	17	19	15	19	21	19	17	14	18
27-03-2023	20	17	18	18	16	18	18	17	18	18	16	22
28-03-2023	18	18	17	20	17	16	17	18	22	23	21	20

Anexo 5: Diagrama de análisis Causa Raíz.



Anexo 6: Datos de medición de Turbidez de alimentación y descarga de Prefiltrado en Primera Implementación de Mejora.

Medición de Turbidez en Alimentación de Prefiltrado en Primera Implementación de Mejora												
Fecha	Horario de Medición											
	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00	22:00	0:00	2:00	4:00	6:00
10-05-2023	1,65	1,72	1,67	1,61	1,84	1,93	1,78	1,69	1,85	1,68	1,73	1,67
11-05-2023	1,60	1,69	1,59	1,70	1,90	1,87	1,67	1,73	1,77	1,65	1,71	1,63
12-05-2023	1,70	1,73	1,63	1,64	1,78	1,95	1,71	1,79	1,81	1,71	1,66	1,70
13-05-2023	1,63	1,63	1,59	1,62	1,83	1,87	1,75	1,80	1,79	1,64	1,75	1,59
14-05-2023	1,68	1,74	1,61	1,66	1,81	1,85	1,82	1,75	1,83	1,69	1,83	1,64
15-05-2023	1,69	1,69	1,70	1,73	1,91	1,91	1,79	1,70	1,81	1,63	1,76	1,76
16-05-2023	1,59	1,60	1,77	1,75	1,87	1,93	1,70	1,71	1,78	1,65	1,81	1,63

Medición de Turbidez en Descarga de Prefiltrado en Primera Implementación de Mejora												
Fecha	Horario de Medición											
	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00	22:00	0:00	2:00	4:00	6:00
10-05-2023	0,89	0,90	0,99	0,93	1,01	0,98	0,91	0,95	0,99	0,87	1,01	0,93
11-05-2023	0,91	0,93	0,91	0,87	0,99	1,01	0,93	0,89	1,01	0,94	0,98	0,93
12-05-2023	0,87	0,96	0,93	0,95	0,94	0,99	0,92	1,01	0,92	0,91	0,93	0,87
13-05-2023	0,91	0,92	0,87	0,91	0,95	0,97	0,89	0,96	0,96	0,95	0,87	0,94
14-05-2023	0,93	0,87	0,89	0,98	0,97	1,03	0,95	0,98	0,91	0,90	0,97	0,92
15-05-2023	0,87	0,86	0,94	0,87	0,99	0,95	0,88	0,90	0,93	0,89	0,99	0,87
16-05-2023	0,86	0,91	0,92	0,89	1,02	0,96	0,87	0,94	0,95	0,92	0,91	0,95

Anexo 7: Resultado de porcentaje de retención en Primera Implementación de Mejora.

Resultado de Porcentaje de Retención en Primera Implementación de Mejora												
Fecha/hora	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00	22:00	0:00	2:00	4:00	6:00
10-05-2023	46,06	47,67	40,72	42,24	45,11	49,22	48,88	43,79	46,49	48,21	41,62	44,31
11-05-2023	43,13	44,97	42,77	48,82	47,89	45,99	44,31	48,55	42,94	43,03	42,69	42,94
12-05-2023	48,82	44,51	42,94	42,07	47,19	49,23	46,20	43,58	49,17	46,78	43,98	48,82
13-05-2023	44,17	43,56	45,28	43,83	48,09	48,13	49,14	46,67	46,37	42,07	50,29	40,88
14-05-2023	44,64	50,00	44,72	40,96	46,41	44,32	47,80	44,00	50,27	46,75	46,99	43,90
15-05-2023	48,52	49,11	44,71	49,71	48,17	50,26	50,84	47,06	48,62	45,40	43,75	50,57
16-05-2023	45,91	43,13	48,02	49,14	45,45	50,26	48,82	45,03	46,63	44,24	49,72	41,72

Anexo 8: Datos de medición de Turbidez de alimentación y descarga de Prefiltrado en Segunda Implementación de Mejora.

Medición de Turbidez en Alimentación de Prefiltrado en Segunda Implementación de Mejora												
Fecha	Horario de Medición											
	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00	22:00	0:00	2:00	4:00	6:00
17-05-2023	1,68	1,73	1,72	1,63	1,84	1,99	1,70	1,87	1,87	1,72	1,73	1,65
18-05-2023	1,61	1,66	1,58	1,69	1,93	1,89	1,75	1,73	1,75	1,66	1,71	1,60
19-05-2023	1,65	1,75	1,60	1,66	1,87	1,91	1,81	1,79	1,79	1,77	1,76	1,72
20-05-2023	1,66	1,64	1,65	1,67	1,80	1,89	1,77	1,80	1,75	1,69	1,75	1,61
21-05-2023	1,64	1,77	1,63	1,69	1,84	1,87	1,84	1,75	1,81	1,68	1,83	1,66
22-05-2023	1,72	1,70	1,73	1,77	1,88	1,96	1,76	1,70	1,89	1,71	1,76	1,76
23-05-2023	1,69	1,68	1,75	1,72	1,90	1,91	1,72	1,71	1,92	1,69	1,81	1,70

Medición de Turbidez en Descarga de Prefiltrado en Segunda Implementación de Mejora												
Fecha	Horario de Medición											
	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00	22:00	0:00	2:00	4:00	6:00
17-05-2023	0,67	0,69	0,59	0,68	0,70	0,74	0,73	0,59	0,69	0,66	0,70	0,64
18-05-2023	0,55	0,66	0,62	0,70	0,73	0,68	0,74	0,64	0,70	0,71	0,73	0,66
19-05-2023	0,63	0,56	0,60	0,69	0,71	0,70	0,72	0,71	0,72	0,69	0,55	0,59
20-05-2023	0,65	0,70	0,54	0,60	0,63	0,73	0,67	0,70	0,77	0,60	0,59	0,61
21-05-2023	0,59	0,65	0,68	0,61	0,75	0,71	0,68	0,69	0,60	0,68	0,69	0,59
22-05-2023	0,69	0,63	0,59	0,71	0,71	0,75	0,74	0,71	0,79	0,65	0,67	0,69
23-05-2023	0,70	0,73	0,71	0,65	0,72	0,69	0,71	0,68	0,73	0,70	0,73	0,67

Anexo 9: Resultado de porcentaje de retención en Primera Implementación de Mejora.

Resultado de Porcentaje de Retención en Segunda Implementación de Mejora												
Fecha/Hora	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00	22:00	0:00	2:00	4:00	6:00
17-05-2023	60,12	60,12	65,70	58,28	61,96	62,81	57,06	68,45	63,10	61,63	59,54	61,21
18-05-2023	65,84	60,24	60,76	58,58	62,18	64,02	57,71	63,01	60,00	57,23	57,31	58,75
19-05-2023	61,82	68,00	62,50	58,43	62,03	63,35	60,22	60,34	59,78	61,02	68,75	65,70
20-05-2023	60,84	57,32	67,27	64,07	65,00	61,38	62,15	61,11	56,00	64,50	66,29	62,11
21-05-2023	64,02	63,28	58,28	63,91	59,24	62,03	63,04	60,57	66,85	59,52	62,30	64,46
22-05-2023	59,88	62,94	65,90	59,89	62,23	61,73	57,95	58,24	58,20	61,99	61,93	60,80
23-05-2023	58,58	56,55	59,43	62,21	62,11	63,87	58,72	60,23	61,98	58,58	59,67	60,59