



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA, BIOTECNOLOGÍA Y
MATERIALES

EVALUACIÓN DE REDUCCIÓN DE CONSUMO DE AGUA
FRESCA EN MÁQUINA PAPELERA DE TISSUE
CASO REAL PLANTA TALAGANTE, CMPC

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
QUÍMICO

NICOLÁS ALEJANDRO QUEZADA LEZANA

PROFESOR GUÍA:

FRANCISCO GRACIA CAROCA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

CRISTÓBAL RÍOSECO VILLABLANCA

FELIPE DÍAZ ALVARADO

Este trabajo fue parcialmente financiado por CMPC Tissue S.A.

SANTIAGO DE CHILE

2019

RESUMEN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
Ingeniero Civil Químico.
POR: Nicolás Alejandro Quezada Lezana
FECHA: Abril 2019
PROFESOR GUÍA: Francisco Gracia C.

EVALUACIÓN DE REDUCCIÓN DE CONSUMO DE AGUA FRESCA EN MÁQUINA PAPELERA DE TISSUE, CASO REAL PLANTA TALAGANTE, CMPC

El papel Tissue se caracteriza por ser un papel suave y absorbente, utilizado tanto en el hogar como a nivel institucional. Las características del papel como la suavidad, textura, bajo gramaje y capacidad de absorción otorgan una variedad de usos, a través de formatos como el papel higiénico, pañuelos, toallas y servilletas.

El presente trabajo se desarrolla en la planta CMPC Tissue Talagante, Chile, y tiene como objetivo reducir el consumo de agua asociado a la máquina papelera N°2 (MP2), desde los 32 hasta la meta de 20 [m³ agua/tonelada de papel producido]. Para ello, se realizó un diagnóstico empírico del proceso de la planta identificando los consumos actuales de agua y realizando el balance de masa global. Posteriormente, se elabora un estudio de alternativas que permitan reducir dichos consumos de agua, a través de variables manipulables operacionales.

El principal problema encontrado en el proceso es la clarificación de aguas del proceso de la MP2, donde una fracción del proceso se encuentra fuera de servicio. Este problema representa el 49% del consumo de agua actual en la máquina, y puede ser reducido si algunos equipos de separación sólido – fluido, tales como un espesador, un fraccionador de fibras, un clarificador y filtros de arena operan de manera adecuada. Al no tener estos equipos en servicio, se sobreconsume 600 [m³/día] de agua y se desperdician 3,8 [ton/día] de fibra de celulosa aproximadamente. Se realizaron estudios de operación y eficiencia a estos equipos, proyectando poner en servicio su totalidad, donde el ahorro de agua es de 516,5 [m³/día] y 2,89 [ton/día] de fibras recuperadas. Para llevar a cabo la gestión, se realizó una evaluación económica que considera la operación del proceso completo, arrojando un gasto total de 99242 [USD], subestimado dado la falta de respuestas de algunos proveedores. Finalmente, en conjunto con otras propuestas puntuales, el consumo de agua específico en la MP2 puede reducirse desde 17,74 a 7,85 [m³ agua/ton papel] para la configuración Crescent Former y de 42,96 a 18,16 [m³ agua/ton papel] para la configuración Atmos.

Además, se proyecta a futuro un estudio de reducción del agua de industrial en la máquina papelera N°1, la cual posee el consumo más grande de la planta. Las propuestas consideran soluciones a largo plazo, las que ayudarían a reducir el consumo total de la planta y alcanzar la meta propuesta al año 2020.

Agradecimientos

A mi familia, que me ha acompañado durante toda la vida, que me ha formado y desarrollado para ser la persona que soy el día de hoy, no sé qué haría ni qué sería sin ellos.

Al departamento de ingeniería de procesos de fabricación de CMPC Tissue Talagante (Bárbara, Reina, Nicole, Juanito y Cristóbal), y CMPC Tissue Puente Alto (Lorena, Ricardo y Marcelo), por enseñar y formar acerca del trabajo en una planta de procesos, forjar carácter y aconsejar sobre la vida profesional de la ingeniería.

A BioLigno, mejor grupo de trabajo que he tenido en la vida, Mati, Vicho y Cami, por las reuniones de trabajo y buena compañía.

Al grupo organizado cde!, que me permitió conocer personas maravillosas que se interesan por la acción social y el bienestar comunitario, además de conocer otras perspectivas de la vida universitaria y enfoques en otras carreras, a través de las problemáticas presentadas en los trabajos realizados.

A mis amigos de sección, que a pesar de que nos vemos poco, se pasan momentos agradables cuando nos juntamos.

A Arcángel Pa, que me enseñó a pasarla bien en todo momento.

A mi conejo redondo, Bestia, que si bien siempre está enojado conmigo, su compañía y suavidad me da un buen comienzo día a día.

A las personas que han conformado mi trayectoria universitaria en algún sentido u otro, gracias.

Tabla de contenido

1	Introducción.....	1
1.1	Motivación.....	1
1.2	Objetivos.....	3
1.2.1	Objetivo general.....	3
1.2.2	Objetivos específicos.....	3
2	Marco teórico.....	4
2.1	La empresa.....	4
2.2	Sustentabilidad empresarial y política de medioambiente de CMPC.....	5
2.3	Productos.....	6
2.4	Materias primas y clasificación de productos.....	7
2.4.1	Celulosa.....	7
2.4.2	Fardos de papel reciclado.....	7
2.5	Proceso de la fabricación de papel Tissue.....	8
2.5.1	Preparación pasta.....	9
2.5.2	Proceso de secado.....	12
2.5.3	Conversión.....	14
2.5.4	Tratamiento de aguas.....	15
2.6	Agua en el proceso de fabricación de papel.....	18
2.6.1	Definición y tipos de agua en el proceso.....	18
2.6.2	Usos del agua industrial en la planta de Talagante.....	18
2.6.3	Usos del agua industrial en la máquina papelera N°2.....	20
2.7	Clarificación de aguas del proceso.....	22
2.8	Microbiología en el agua clarificada.....	25
3	Diagnóstico del agua en la Máquina Papelera N°2.....	28
3.1	Puntos de consumo actual en la planta de Talagante.....	28
3.2	Puntos de consumo actual en la máquina papelera N°2.....	28
3.3	Metodologías para la estimación de flujos.....	29
3.4	Resultados principales.....	30
3.5	Consumos específicos de cada máquina papelera.....	32
4	Estudio de alternativas para la reducción del consumo de agua.....	33
4.1	Metodología general para la reducción de consumo de agua.....	33

4.2 Investigación del consumo de agua industrial en clarificación	34
4.2.1 Estado actual de equipos fuera de servicio	35
4.2.2 Diagnóstico de operación	39
4.2.3 Estudio de pérdidas en clarificación de aguas	41
4.3 Metodologías para plan de acción en clarificación de aguas	42
4.3.1 Operación de equipos fuera de servicio.....	43
4.3.2 Estudio de eficiencias	43
4.4 Metodología para el estudio de reciclaje de agua de efluentes	44
4.4.1 Evaluación técnica para uso del agua de efluentes en línea de agua fresca	44
4.4.2 Aspectos a evaluar en el agua de efluentes	45
5 Resultados y discusiones	47
5.1 Problemas de consumo puntuales y mejoras operacionales en MP2	47
5.1.1 Control del agua en Calandra	47
5.1.2 Control del agua en Despiche de Silo TQ-314.....	47
5.1.3 Gestión de válvula reguladora	47
5.1.4 Sello mecánico en BB-314.....	48
5.1.5 Control de flujos de agua en pantalla de DCS	48
5.1.6 Impactos de ahorro de agua en consumos puntuales	49
5.2 Eficiencias de equipos fuera de servicio en MP2.....	51
5.2.1 Fraccionador de fibras	51
5.2.2 Espesador.....	53
5.2.3 Reducción de agua industrial en clarificación	54
5.2.4 Recomendaciones para mantenimiento de operación	56
5.3 Evaluación del agua de efluentes para integrarse a la red de agua industrial	57
5.3.1 Estudio microbiológico	58
5.3.2 Estudio de los microplásticos.....	58
5.3.3 Impacto de reducción de agua industrial	62
5.4 Recomendaciones extras.....	63
5.4.1 Máquina Papelera N°1 (MP1)	63
5.4.2 Preparación de Pasta 1 (PPA1).....	67
5.4.3 Caldera de vapor	68

5.5 Costos parciales e impactos de consumo de agua	68
5.6. Discusiones generales	71
5.6.1 Discusiones en torno a la MP2	71
5.6.2 Discusiones en torno al uso del agua de efluentes.....	76
5.6.3 Discusiones en torno a otras soluciones encontradas	77
6 Conclusiones.....	79
7 Glosario	85
8 Bibliografía	86
9 Nomenclatura técnica.....	89
10 Anexos	90
Anexo A: Consumos de agua industrial en MP2.....	90
Anexo B: Producción diaria de papel	95
Anexo C: Consumos específicos promedio	96
Anexo D: Cálculo de flujo de agua normalizado	97
Anexo E: Pantallas de control de agua industrial en máquina	99
Anexo F: Carta Gantt para programación de operación del espesador.	105

Índice de figuras

Figura 1: Proceso general de la producción de papel Tissue [1].	1
Figura 2: Filiales de CMPC a lo largo de Sudamérica [2].	4
Figura 3: Pirámide invertida de la jerarquización de la manipulación de residuos [5].	5
Figura 4: Productos domésticos e industriales elaborados por CMPC [7].	6
Figura 5: Patio de materias primas. A la izquierda se observan papelotes de papel reciclado, mientras que a la derecha se observan fardos de celulosa.	8
Figura 6: Vista interior y exterior de un pulper hélico para la fabricación de papel [9].	9
Figura 7: Depurador ciclónico estándar [10].	9
Figura 8: Dispersor utilizado en la fabricación de papel [11].	10
Figura 9: Refinador usado para la fabricación de papel [12].	11
Figura 10: Proceso de preparación pasta genérico (Elaboración propia).	11
Figura 11: Esquema del circuito de aproximación de la pasta hacia la máquina papelera (Elaboración propia).	12
Figura 12: Diagrama del proceso de secado en una máquina papelera. El ingreso de la pasta ocurre en el sector izquierdo, mientras que la bobinación del papel ocurre en el lado derecho [15].	13
Figura 13: Esquema del proceso de secado con la capota (estructura superior) y el cilindro Yankee (Elaboración propia).	13
Figura 14: Configuración de la MP2, desde la caja de entrada hasta la generación del jumbo (Elaboración propia).	14
Figura 15: Esquema de la conversión de papel en productos con formato de rollos (Elaboración propia).	15
Figura 16: Esquema de la conversión de papel en productos con formato de doblados (Elaboración propia).	15
Figura 17: Parte del circuito de clarificación de aguas. A la izquierda se encuentra un fraccionador de fibras, mientras que a la derecha se encuentra el clarificador.	17
Figura 18: Planta de tratamiento de efluentes de CMPC Talagante.	18
Figura 19: Diagrama del uso de agua en la planta de CMPC Tissue Talagante (Elaboración propia).	19
Figura 20: Esquema del fraccionador de fibras. (I) es el ingreso del flujo, (C) es el concentrado de fibras útiles, (S) es la canasta de criba, (M) es el motor de giro y (F) es el agua con partículas finas.	22
Figura 21: Esquema del espesador, donde el flujo ingresa por debajo (R), obteniendo agua con partículas finas (C) y partículas sólidas concentradas (T), con ayuda de las regaderas (S).	23
Figura 22: Imagen transversal del clarificador DAF, donde el ingreso del flujo se realiza en el medio del equipo. El retiro de los lodos se realiza con el cucharón (color negro).	23

Figura 23: Esquema del filtro de arena. El ingreso del flujo se realiza en (A), el agua clarificada se dirige a (B) y el agua sucia se representa por (C). El sistema de levantamiento de la arena sucia se realiza en (D).....	24
Figura 24: Circuito de clarificación general en planta de fabricación.....	25
Figura 25: Formas de corrosión del ácido sulfhídrico al acero [22].	26
Figura 26: Acumulación de bacterias filamentosas dado el entrecruzamiento de los flagelos [25].	27
Figura 27: Circuito de agua industrial final de la MP2 con las conexiones existentes (Elaboración propia). M se refiere a apertura manual, mientras que A se refiere a apertura automática.	30
Figura 28: Magnitud de consumo de agua según área de proceso de la MP2.	31
Figura 29: Metodología general para la resolución de los problemas asociados al consumo de agua en el proceso de fabricación (Elaboración propia).	33
Figura 30: Diagrama de Ishikawa de las causas de los problemas en la clarificación de aguas en la MP2.	34
Figura 31: Fraccionador de fibras FF-324. La fracción de fibras gruesas va al TQ-325, el agua con finos al TQ-326.	35
Figura 32: Bomba BB-325. Alimenta al espesador EE-324.....	36
Figura 33: Espesador EE-324, el flujo de fibra gruesa ingresa al TQ-350 (Recortes), mientras que el agua con finos se dirige al TQ-326.	36
Figura 34: Bomba BB-335. Alimenta los filtros de arena con agua clarificada.	37
Figura 35: Filtros de arena (FA-335A y B) del circuito de clarificación de aguas de la MP2.....	38
Figura 36: Fibras largas en el agua superclarificada, dirigida hacia el tanque TQ-336 (situación con equipos fuera de servicio).	38
Figura 37: Circuito de clarificación de aguas de la MP2 en su condición idónea. La línea negra representa flujo de fibras, mientras que la línea azul es agua.....	39
Figura 38: Circuito de clarificación de aguas de la MP2 en la actualidad. El color rojo representa las líneas y equipos fuera de servicio.....	40
Figura 39: Presencia de algas en el rebalse de la torre de enfriamiento de la MP2, el cual utiliza agua de efluentes de manera directa en la configuración Atmos.....	45
Figura 40: Flujos de entrada y salida en el fraccionador FF-324. Las líneas negras representan fibras, mientras que las azules representan agua.	52
Figura 41: Flujos de entrada y salida en el espesador EE-324. Las líneas negras representan fibras, mientras que las azules representan agua.	53
Figura 42: Uso actual del agua clarificada obtenida desde la planta de efluentes, definiendo el consumo de agua industrial en la prensa de lodos N°3.	59
Figura 43: Diagrama de proceso propuesto para la instalación del filtro de microplásticos.....	60
Figura 44: Diseño de la nueva red de agua industrial incluyendo al agua obtenida desde efluentes. El agente biocida se agregaría en el tanque TQ-381, y los porcentajes pueden variar.	61

Figura 45: Imagen del filtro gravitacional FI-01, el cual se encuentra descuidado y sin la malla filtrante.....	65
Figura 46: Imagen del filtro gravitacional FI-02, el cual se encuentra descuidado y sin la malla filtrante.....	65
Figura 47: Conexión cortada a la válvula de agua industrial que alimenta al intercambiador de calor.....	66
Figura 48: Intercambiador de calor y flujo de agua descargado a piso en Preparación Pasta 1.....	68
Figura 49: Consumos específicos finales si se implementan todas las soluciones propuestas.....	71
Figura 50: Consumos específicos de agua por máquina si se implementan las propuestas definidas, sin considerar el reemplazo del agua de efluentes.	82
Figura 51: Costos asociados para implementación de soluciones.....	83
Figura 52: Pantalla del DCS de la MP2, mostrando la variación del nivel del tanque TQ-336.....	97
Figura 53: Diagrama de la red de agua industrial en la MP1. Incluye los equipos que pueden controlar su flujo de agua. M se refiere a válvula manual, mientras que A se refiere a válvula automática.....	99
Figura 54: Diagrama de la red de agua industrial en la MP2. Incluye los equipos que pueden controlar su flujo de agua. M se refiere a válvula manual, mientras que A se refiere a válvula automática.....	100
Figura 55: Diagrama de la red de agua industrial en la MP3. Incluye los equipos que pueden controlar su flujo de agua. M se refiere a válvula manual, mientras que A se refiere a válvula automática.....	101
Figura 56: Diagrama de la red de agua general a implementarse en el panel de control. Incluye los flujómetros instalados y por instalar.....	102
Figura 57: Imagen parcial de la implementación del diagrama del agua industrial general en las pantallas del DCS.....	103
Figura 58: Imagen parcial de la implementación del diagrama de agua industrial en la MP1 en las pantallas del DCS.....	103
Figura 59: Imagen parcial de la implementación del diagrama de agua industrial en la MP2 en las pantallas del DCS.....	104
Figura 60: Imagen parcial de la implementación del diagrama del agua industrial en la MP3 en las pantallas del DCS.....	104

Índice de tablas

Tabla 1: Consumo específico de agua por tonelada de papel producido, en diferentes plantas de CMPC Tissue en el año 2017.	2
Tabla 2: Justificación de modificación de variables según definición del uso de agua.	21
Tabla 3: Flujos de agua usada a nivel planta, medidos en el año 2018.	28
Tabla 4: Balance global de agua en la MP2 con el error asociado a la fabricación de papel Crescent y Atmos.	31
Tabla 5: Principales consumos de agua registrados en el proceso de la MP2 (resumen de la Tabla 37).	31
Tabla 6: Consumos específicos de agua en cada máquina papelera.	32
Tabla 7: Flujos de fibra en el proceso de clarificación de aguas en fabricación de papel Crescent Former.	42
Tabla 8: Flujos de fibra en el proceso de clarificación de aguas en fabricación de papel Atmos.	42
Tabla 9: Flujos de agua industrial antes y después del arreglo de la válvula reguladora del tanque TQ-336.	48
Tabla 10: Impactos de consumo reducidos para los problemas eventuales encontrados en la máquina para Crescent Former.	49
Tabla 11: Impactos de consumo reducidos para los problemas eventuales encontrados en la máquina para Atmos.	49
Tabla 12: Consumo final de la MP2 posterior a las modificaciones puntuales para la configuración Crescent Former. Se utiliza el dato de producción diaria promedio.	50
Tabla 13: Consumo final de la MP2 posterior a las modificaciones puntuales para la configuración Atmos. Se utiliza el dato de producción diaria promedio.	50
Tabla 14: Medición final en configuración Crescent Former, incluyendo la bomba de alta presión nueva a instalar.	51
Tabla 15: Medición en configuración Atmos, incluyendo la bomba de alta presión nueva a instalar.	51
Tabla 16: Valores de flujos asociados al fraccionador de fibras FF-324.	52
Tabla 17: Valores de flujos asociados al espesador EE-324.	53
Tabla 18: Parámetros para el lavado del filtro de arena, entregados por el proveedor del equipo.	54
Tabla 19: Flujos de agua utilizados en el filtro de arena y consumo final en MP2 en configuración Crescent Former, con una producción de 73,87 [ton/día].	55
Tabla 20: Flujos de agua utilizados en el filtro de arena y consumo final en MP2 en configuración Atmos, con una producción de 34,18 [ton/día].	55
Tabla 21: Consumo final de la MP2 con la propuesta del filtro de arena operando, en configuración Crescent Former.	55
Tabla 22: Consumo final de la MP2 con la propuesta del filtro de arena operando, en configuración Atmos.	56
Tabla 23: Principales microorganismos a analizar en el agua industrial y en el agua proveniente desde la planta de efluentes.	58

Tabla 24: Especificaciones técnicas del filtro de microplásticos.....	59
Tabla 25: Flujos de agua industrial dirigidos a la MP2 y MP3 con el circuito de clarificación de aguas completo en MP2.	62
Tabla 26: Flujos de agua industrial dirigidos a la MP2 y MP3 con el circuito de clarificación de aguas incompleto en MP2.	62
Tabla 27: Ahorro de agua industrial aproximado al implementar el uso de agua de efluentes en la red de agua industrial, considerando ambas configuraciones en la MP2.....	63
Tabla 28: Datos de la torre de enfriamiento idónea para el sistema de vacío en la MP1.....	64
Tabla 29: Ahorro de consumo específico de agua al implementar las soluciones propuestas en la MP1. Se utiliza como producción promedio el valor de 70.54 [ton/día].	67
Tabla 30: Costos de los flujómetros según diámetro. Datos obtenidos desde cotización.	69
Tabla 31: Cuadro resumen de los costos totales de los elementos que aportan a la reducción del uso de agua industrial. Se fija 1 UF = 40 dólares, valor en febrero 2019.	70
Tabla 32: Situación inicial, actual y final con propuestas en Crescent Former, considerando una producción promedio de 73,87 [ton/día].....	81
Tabla 33: Situación inicial, actual y final con propuestas en Atmos, considerando una producción promedio de 34,18 [ton/día].	82
Tabla 34: Flujo de agua ahorrado al implementar las soluciones propuestas en este estudio.....	84
Tabla 35: Conexiones de agua industrial existentes en la MP2, clasificadas según tipo de ingreso y ubicación.	90
Tabla 36: Clasificación del agua del proceso de acuerdo a la categoría de conexión, vigencia y forma de medición.	91
Tabla 37: Consumos de agua industrial en cada conexión vigente en el proceso de la MP2, ordenado de mayor a menor para Atmos.....	93
Tabla 38: Producción promedio diaria de papel, para cada máquina papeleras.....	95
Tabla 39: Consumo específico estimado para cada máquina papeleras, al inicio del estudio.....	96
Tabla 40: Consumo específico promedio entre las 3 máquinas papeleras operativas.	96
Tabla 41: Datos necesarios para el cálculo de flujo de agua normalizado.	98
Tabla 42: Carta Gantt para operación del espesador EE-324.....	105

1 Introducción

1.1 Motivación

El papel Tissue es un tipo de papel que se destaca por su textura y suavidad, con una gran capacidad absorbente, bajo peso y estructura de capas, utilizado ampliamente en el sector doméstico – hogar y a escala industrial. Las marcas más reconocidas de CMPC Tissue se concentran en Elite, Noble, Confort, Abolengo, entre otros.

La fabricación de papel es un proceso complejo que requiere de varios recursos para obtener el papel deseado controlado según sus características físicas y mecánicas. Fabricar papel involucra varios factores controlados, tales como las fibras de celulosa, energía eléctrica, petróleo, gas natural, agua y agentes químicos, los que se utilizan de manera conjunta para elaborar papel para diversos usos.

El proceso de elaboración de papel se puede segmentar en 3 etapas: Preparación de pasta, proceso de secado y conversión. La preparación de pasta consiste en la formación de la pulpa de celulosa a partir de fardos de celulosa virgen y/o papel reciclado, disgregando las fibras con agua. Este flujo de pasta es depurado de sus contaminantes, dispersado a alta temperatura y fibrilado en los refinadores. La etapa de secado consiste en el ingreso de la pasta hacia la máquina papelera, apoyada en una tela transportadora accionada por rodillos y succionada por vacío a través de dichas vestimentas, donde sufre un proceso mecánico de desgotamiento de agua y un proceso de secado con intercambio de calor referido a la evaporación del agua, formando la hoja de papel Tissue con un bajo grado de humedad, generándose el jumbo de papel. Finalmente, el jumbo ingresa a la etapa de conversión, donde se desenrolla, pasa por la gofradora y laminadora, se corta y se sella, entregando el producto final listo para comercializarse. En el siguiente diagrama se resume el proceso de manera gruesa, involucrando los recursos de fabricación y los productos de salida en conversión:

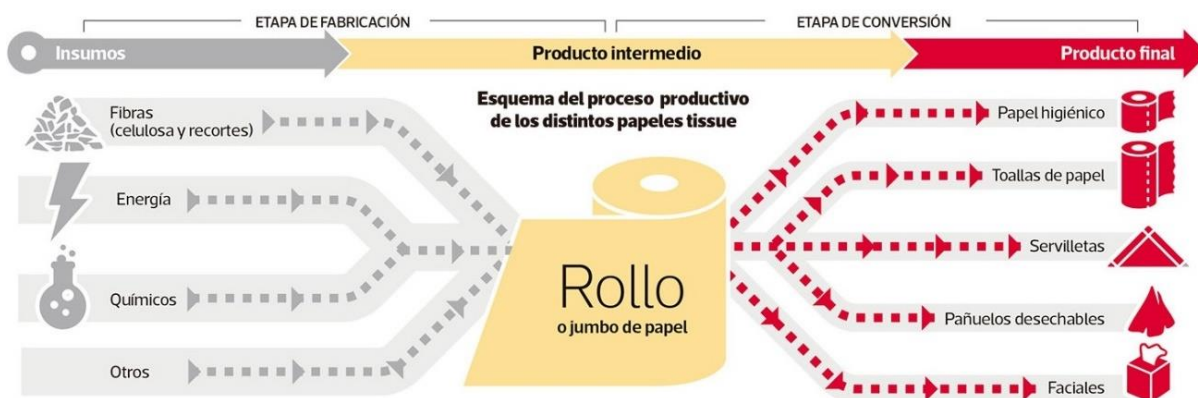


Figura 1: Proceso general de la producción de papel Tissue [1].

Existe otra parte del proceso de fabricación que se involucra de manera indirecta al proceso de elaboración de papel, considerándose como una etapa extra: El tratamiento de aguas. El proceso general utiliza agua en las 3 etapas antes mencionadas, por lo que

se genera un caudal de gran magnitud de aguas blancas que necesitan ser procesadas. El proceso de clarificación se divide en una etapa de fraccionamiento de fibras, que selecciona la fibra de largo útil y es devuelta a la preparación de pasta; una etapa de espesamiento donde la fibra útil se concentra para ser enviada a la preparación de pasta, generando agua con partículas finas; una etapa de clarificación y adición de agentes químicos, donde se elimina los lodos ricos en fibras finas floculadas y coaguladas, entregando agua con bajo contenido de sólidos; y una etapa de filtrado, donde se eliminan contaminantes pequeños entregando agua de mejor calidad que puede ser reutilizada en el proceso, mayoritariamente para el sistema de vacío y para las regaderas presentes en la máquina.

La planta de CMPC Tissue Talagante posee 3 máquinas papeleras, donde la máquina papelera N°2 (MP2) presenta la particularidad de elaborar 2 tipos de papel: Papel Crescent Former y Papel Atmos, ambos papeles diferenciados en la textura, estructura de las fibras y humedad. A pesar de que el proceso para fabricar ambos papeles es muy similar, las velocidades de producción son diferentes, observando una distinción entre los usos de agua de cada fabricación de papel.

Para elaborar papel se necesita de agua proveniente de napas subterráneas, una fuente natural que puede verse en peligro si no se regula a largo plazo, generando impactos ambientales en zonas cercanas a la planta. Es por esto que las líneas de acción de este estudio se centran en el cumplimiento de la política sustentable interna de CMPC, el cual busca disminuir el uso de los recursos acuíferos para la producción de papel.

La política sustentable de CMPC indica como meta la de alcanzar un consumo de agua fresca específica para la producción de papel para el año 2020, aproximado en un gasto de 20 [m³ agua/tonelada papel] por cada máquina papelera. Para cuantificar el impacto de esta planta, la siguiente tabla muestra los consumos específicos comparados entre algunas plantas de CMPC Tissue:

Tabla 1: Consumo específico de agua por tonelada de papel producido, en diferentes plantas de CMPC Tissue en el año 2017.

Planta de producción	Consumo específico promedio [m³ agua/tonelada papel]
Perú	15
Talagante (MP2)	32
Puente Alto (MP1)	41

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Investigar, registrar y analizar los usos de agua fresca en el proceso de fabricación de papel Tissue de la máquina papelera N°2, con el fin de evaluar alternativas de reducción de consumo de agua a nivel operacional y global.

1.2.2 Objetivos específicos

- Investigación de los usos del agua a nivel planta.
- Estudio de la producción de la máquina papelera 2 (MP2), identificando especialmente los usos del agua industrial en el proceso.
- Clasificación del uso del agua e indagación de los puntos existentes en la MP2.
- Medición de los consumos de agua y jerarquización del uso de agua de acuerdo a la magnitud de consumo y relevancia en la etapa del proceso.
- Diagnóstico general de la situación del consumo de agua en la MP2.
- Evaluación de alternativas para la reducción del consumo de agua que se puedan implementar a corto – mediano plazo, a través de una jerarquización enfocada al diseño sustentable.
- Estimación de impacto actual de consumo de agua y con medidas de reducción, evaluando el nuevo consumo específico de agua por tonelada de papel producido.
- Evaluación económica de los requerimientos necesarios para mantener un bajo consumo de agua, evaluado a corto – mediano plazo.
- Análisis breve de los consumos de agua en las otras líneas de la planta y propuestas de reducción asociadas.

2 Marco teórico

2.1 La empresa

CMPC S.A. (Compañía Manufacturera de Papeles y Cartones S.A.) es una empresa dedicada a la elaboración de diversos productos provenientes del área forestal basado en celulosa y madera, para formar cartones, embalajes y papeles varios. Actualmente, esta empresa comprende de un holding con 5 filiales: CMPC Forestal, CMPC Celulosa, CMPC Papeles, CMPC Productos de papel y CMPC Tissue.

Esta empresa fue fundada en el año 1920 en Chile y se ha expandido hacia diferentes continentes, alcanzando clientes en 45 países del mundo. Con respecto a las fábricas existentes, hay 45 plantas que se encuentran operativas en 8 países de Latinoamérica [2] [3].

CMPC Tissue posee un gran comercio de productos en distintos países de Latinoamérica, tales como Chile, Perú, Brasil, México, Argentina, Colombia, Ecuador y Uruguay, utilizando una gran variedad de marcas de gran reconocimiento local. Los productos Tissue comercializados consisten en toallas de papel higiénico, servilletas, pañuelos de papel y faciales. Además, se considera como producto Tissue los productos de categoría sanitaria de carácter desechable, tales como toallas femeninas, pañales para adulto y bebé.



Figura 2: Filiales de CMPC a lo largo de Sudamérica [2].

Actualmente en Chile existen 2 plantas que elaboran productos Tissue:

- Planta Puente Alto: Produce pañales desechables Babysec, papel Tissue de marca Confort, Elite, Ecológico (industrial), Noble y Preferido. Esta planta cuenta con 2 máquinas papeleras que trabajan de manera continua.
- Planta Talagante: Produce papel Tissue como Elite, Noble y Nova. Cuenta con 3 máquinas papeleras que trabajan de manera continua.

La planta de CMPC Tissue fue inaugurada en el año 1995, con la instalación de 2 máquinas papeleras de Tissue, denominadas Máquina Papelera N°1 y N°2 (MP1 y MP2). Posteriormente, en el año 2004 hubo una ampliación en la variedad de producción en la MP2 (integración de un nuevo tipo de fabricación de papel) y finalmente en el año 2013, se instaló la máquina papeleras N°3 (MP3), produciendo en conjunto un aproximado de 90 mil toneladas de papel al año desde entonces. En esta planta existe la particularidad de que la Máquina Papelera N°1 produce papel 100% hecho de celulosa, mientras que la Máquina Papelera N°2 y N°3 utilizan celulosa y papel reciclado [2].

2.2 Sustentabilidad empresarial y política de medioambiente de CMPC

La sustentabilidad es una corriente de pensamiento cuyo objetivo es lograr el bienestar de la humanidad y de su entorno natural, donde se delega intrínsecamente una responsabilidad hacia el hombre de mantener el medio ambiente adecuado para las generaciones futuras, a través de la conservación del mismo y la reinversión de los daños causados por el hombre hacia los recursos naturales.

Este tópico ha sido un fenómeno dentro de la gerencia de las empresas, pues al adoptar un pensamiento sostenible mejora la competencia entre empresas, posiciona de mejor manera los productos fabricados y son prioridad en la oferta de servicios que entregan. Así, varias empresas han comenzado a tomar acción en sus estrategias de producción, rediseñando sus procesos e invirtiendo en nuevas tecnologías para el desarrollo de sus productos o servicios [4].

Para guiar esta corriente de pensamiento, se ha diseñado una pirámide de pasos para poder alcanzar la sustentabilidad empresarial con respecto a la minimización del uso de los recursos naturales, basado en el manejo de los residuos. A partir de esta jerarquización, es posible disponer de alternativas que permitan reevaluar el diseño de procesos o modelo de negocios para minimizar el impacto de los recursos naturales, a través del modelo de las 3R (Reducir – Prevenir, Reutilizar, Reciclar), utilizando el esquema de la siguiente figura:



Figura 3: Pirámide invertida de la jerarquización de la manipulación de residuos [5].

Por otro lado, CMPC Empresas ha incorporado una política de sustentabilidad y gobierno corporativo que vela por la responsabilidad social que tiene con la comunidad, a través de su modelo de negocios, cuidado a sus trabajadores, compromiso con la comunidad y con el medio ambiente [6]. Este compromiso fue firmado a partir de un acuerdo oficializado con el Pacto Mundial de la ONU, el cual busca cambiar el modelo de ciclo de vida de la producción de papel, cumpliendo con aspectos variados como la valorización de residuos, cumplimiento de normativas ambientales, priorización del uso de fibras recicladas, innovación de productos y cuidado de los recursos naturales, dirigiendo el modelo de negocios hacia una cadena de valor sustentable a futuro.

Con respecto al cuidado de los recursos, la empresa ha fijado objetivos específicos a cumplir en el año 2020, tales como:

- Minimización de impactos y accidentes medioambientales.
- Minimización en el uso de recursos: Combustibles y energía (petróleo), gas natural, agua y electricidad.
- Minimización de la generación de residuos finales.

Centrado en el uso de recursos hídricos en la planta de Talagante, se ha fijado un consumo específico objetivo de agua por tonelada de papel elaborado para las plantas de papel Tissue, cercano a los 20 [m³ agua/tonelada papel] para el año 2020. Bajo este contexto, de acuerdo a la Tabla 1, la planta de Talagante sobrepasa este consumo por una cantidad de agua aproximada a los 12 [m³ agua/tonelada papel]. Utilizando esta información y la jerarquía para la intervención sustentable de los procesos, se propondrá una metodología a implementar en este trabajo, priorizando la reducción del uso del agua en la MP2 y luego, el reciclaje de agua de proceso.

2.3 Productos

La empresa se dedica a fabricar una amplia gama de productos Tissue, los cuales se diferencian por humedad, aditivos agregados, textura, calidad de suavidad y origen de la fibra (celulosa o fibra reciclada). Estos productos se catalogan como económico, ecológico, toalla absorbente Nova, pañuelos Elite y Confort.



Figura 4: Productos domésticos e industriales elaborados por CMPC [7].

Sin embargo, específicamente en la MP2 existe una clasificación interna de acuerdo a propiedades del papel, dividiéndose en 2 tipos:

- Papel Crescent Former: Se denomina al papel convencional Tissue empleado tanto en uso doméstico como profesional. Este papel posee propiedades de resistencia y suavidad media ya que se asocia a los productos convencionales y económicos.
- Papel Atmos: Es un tipo de papel estructurado cuya tecnología aplicada en la fabricación del papel otorga mayor capacidad de absorción y resistencia. Esta estructura es obtenida a través de la tela de molde en la etapa de formación de papel en la máquina, formando los espacios que se encargarán de absorber los líquidos.

2.4 Materias primas y clasificación de productos

Para la elaboración del papel Tissue, se pueden utilizar 2 materias primas, tales como la fibra de celulosa virgen o el papel reciclado. Así, la receta de papel se define de acuerdo a una proporción de estas materias primas y la calidad que posee, determinado en función de la blancura que se desea obtener en el producto.

2.4.1 Celulosa

La celulosa es obtenida directamente desde la madera virgen tratada de manera mecánica y química, y es utilizada para fabricar papel de alta calidad debido a la blancura que puede alcanzar y de la baja concentración de impurezas que posee en comparación al papel reciclado. Los papeles fabricados con celulosa virgen de alta calidad tienen como propiedad una alta resistencia mecánica, gran blancura y suavidad [8]. Esta materia prima se compone en su mayoría de fibra útil (también denominada fibra larga, con un largo mayor a 75 [μm] y un ancho mayor a 5 [μm]), pues posee poca presencia de partículas finas.

La celulosa se puede clasificar según su método de elaboración, obteniendo 2 tipos:

- Pulpa mecánica: Se produce a partir de la desfibrilación y trituración de la madera, la cual es presionada contra un cilindro giratorio que desprende astillas y fibras. Este método rompe las fibras de celulosa, por lo que la pulpa final posee una menor calidad y se utiliza para elaborar cartones y revistas.
- Pulpa termoquímica: Es un proceso similar al anterior, salvo que las astillas se sumergen en una solución alcalina de sulfito de sodio, aislando la celulosa desde el resto de compuestos existentes en la pulpa, obteniendo una mejor calidad de papel.

2.4.2 Fardos de papel reciclado

Estos fardos pueden contener papel o cartón reciclado y se denominan papelotes. Estos fardos se clasifican según su grado de blancura que aporta, utilizándose principalmente para papeles de calidad media y baja. Estos papeles contienen una menor cantidad de fibra útil debido a que son papeles procesados y utilizados previamente, por lo que existe una fracción de fibra útil con respecto al total, existiendo mayor presencia de fibra corta (también denominada como fina). Los papelotes usados para la fabricación de papel son:

- Blanco 1: Corresponde al papel o cartulina hecha 100% con celulosa, sin impresión y sin agente de resistencia en húmedo.
- Blanco 2: Corresponde al papel o cartulina hecha 100% con celulosa, con impresión media y un máximo del 2% de revistas, diarios e imprentas.
- Blanco 3: Corresponde al papel o cartulina hecha 100% con celulosa, con impresión alta y un máximo del 10% de papeles con 50% o menos de pulpa mecánica.
- Recorte propio de máquina blanco 1, 2 y 3: Es el papel que realiza la misma máquina que se descarta por no cumplir los estándares de calidad impuestos. Utiliza la misma nomenclatura que los papelotes blancos.
- Duplex: Son cartulinas que poseen una cara de celulosa de alta calidad y otra de pulpa mecánica sin agentes de resistencia en húmedo.
- Revistas: Son papeles con una gran cantidad de revistas y carteles publicitarios. No tienen agente de resistencia en húmedo y pueden tener entre un nivel medio y alto de impresión, además, son altos en pulpa mecánica.
- Corrugados: Son papeles que se componen de un 95% de cartón corrugado o cartulina sin agente de resistencia en húmedo, y un 5% de cartón corrugado o cartulina con agente de resistencia en húmedo. Son altos en pulpa mecánica.



Figura 5: Patio de materias primas. A la izquierda se observan papelotes de papel reciclado, mientras que a la derecha se observan fardos de celulosa.

2.5 Proceso de la fabricación de papel Tissue

El proceso de elaboración de papel involucra una serie de factores que determinan la calidad, textura y suavidad del papel, tales como la consistencia de la pulpa, la cantidad de fibra útil en la pulpa de celulosa y el proceso de secado para formar el jumbo. Dado que el proceso estudiado corresponde a la máquina papelera N°2 (MP2), el proceso de elaboración del papel puede clasificarse en 3 etapas clave: Preparación pasta (incluyendo circuito de aproximación), proceso de secado y conversión. Por último, es necesario mencionar la existencia de la etapa de clarificación de aguas, que no incide en el proceso de la fabricación de papel de manera directa pero que es importante debido a que permite abastecer de agua a las líneas del proceso reutilizando el agua del sistema, evitando generar un sobreconsumo de agua industrial.

2.5.1 Preparación pasta

Es el área cuyos equipos preparan la materia prima para ingresarla a la máquina papelera. Los objetivos de esta área es de disgregar la materia prima, remover impurezas y lograr una mejor calidad en el entrecruzamiento de las fibras, dando mayor área superficial de contacto.

- Disgregación: Consiste en disgregar y suspender en agua la materia prima, formando una pasta de pulpa de manera que puede ser bombeada a lo largo del proceso. El equipo que genera la pulpa se denomina *Pulper*, el cual permite obtener una pasta con una consistencia aproximada entre 4% y 5% dependiendo de la receta y la materia prima utilizada.

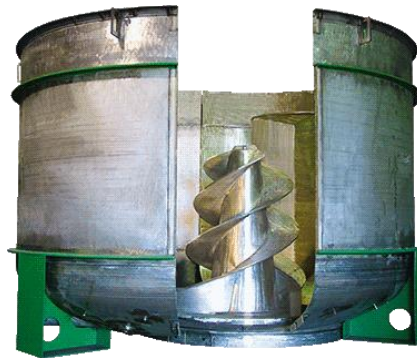


Figura 6: Vista interior y exterior de un pulper hélico para la fabricación de papel [9].

- Depuración: Es una etapa que elimina las impurezas presentes en la pulpa provenientes de los papelotes de reciclado, tales como plásticos, metales, resinas, contaminantes de carácter orgánico e inorgánico sedimentables, entre otros. Se utilizan depuradores ciclónicos, los cuales permiten definir un tamaño de corte para una separación de contaminantes efectiva, a través de la densidad mayor de los componentes a eliminar.

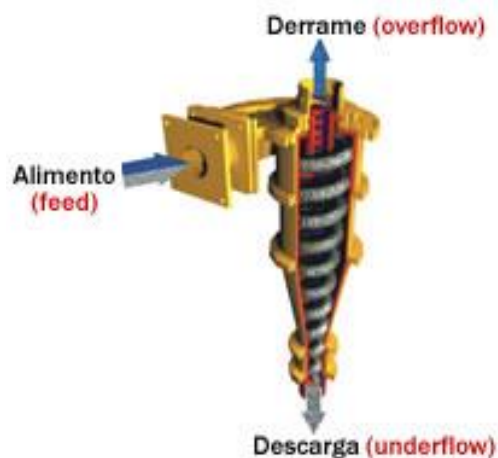


Figura 7: Depurador ciclónico estándar [10].

- **Despastillador:** Es un equipo conformado por discos, uno fijo y otro giratorio, los cuales realizan un esfuerzo mecánico el cual permite disgregar paquetes de fibras en el papel reciclado, además de disgregar astillas no cocidas presentes en la fibra virgen. Este equipo posee un rendimiento modificable regulando la separación de los discos, y puede para papel reciclado y celulosa virgen [8].
- **Espesamiento y Dispersión:** La dispersión se utiliza para eliminar impurezas que cruzaron los equipos de depuración, debido a que tienen un tamaño pequeño. A través de esta operación, dichas impurezas se dispersan y se eliminan posteriormente. Para ingresar al dispersor, la pasta debe poseer una alta consistencia, la cual pasa a través de tornillos sin fin que logran espesarla. Gracias a la dispersión, se obtiene una pulpa con mejores propiedades físicas, debido a que fomenta el entrecruzamiento de las fibras. Este proceso se realiza en un dispersor, un equipo que posee 2 discos, un estator (parte inmóvil) y rotor (parte móvil), separados por un gap y una dentadura complementaria. La pasta se calienta con vapor e ingresa por el espacio reducido entre los discos, aplastando y dispersando pequeñas impurezas.



Figura 8: Dispersor utilizado en la fabricación de papel [11].

- **Refinación:** Es la etapa donde las fibras son aprisionadas por acción mecánica, modificando el área superficial de las fibras para que se generen más puntos de unión entre ellas, alcanzando una mayor resistencia al momento de formar el papel. Este equipo se constituye de 2 discos, uno móvil y uno inmóvil, donde el flujo de pasta pasa a través de ambos. El movimiento giratorio rasga y aplasta la fibra, desprendiendo de manera parcial la capa externa de la misma, aumentando el área superficial.



Figura 9: Refinador usado para la fabricación de papel [12].

Hasta este punto, los equipos pertenecen al área de preparación de pasta de la planta. La configuración de ellos se dispone a través de la siguiente figura:

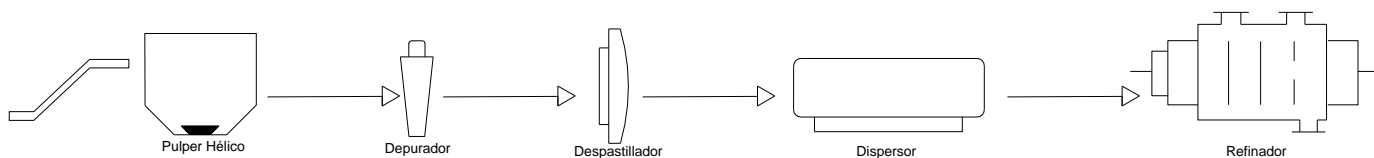


Figura 10: Proceso de preparación pasta genérico (Elaboración propia).

A continuación, se presenta el circuito de aproximación, etapa posterior a la preparación de la pasta:

- Tanque cabecera de máquina: Es un tanque donde se agregan aditivos que otorgan resistencia al húmedo, color (blancura, matizante óptico y abrillantador óptico) y agentes cationizantes a la pulpa, de acuerdo a la receta y el producto que se desea generar. En este contexto, se pueden clasificar los aditivos en 2 tipos:
 - Aditivos de proceso: Son agentes que facilitan la operación a lo largo del proceso. La adición de estos agentes evita perturbaciones operacionales probables en el proceso, mejorando la calidad de producción en el sentido de reducir reventaduras que pudiesen existir en la hoja y el número de paradas en la máquina. Los agentes principales de esta categoría corresponde a productos químicos para el tratamiento de telas y paño de la máquina, control de stickies, biocidas, agentes de drenaje y antiespumantes, floculantes, coagulantes, entre otros [13].
 - Aditivos químicos funcionales: Son productos que confieren propiedades específicas al papel, tales como grado de blancura, humedad, brillo y resistencia mecánica. Los agentes asociados a esta categoría corresponde al almidón, agente de resistencia al húmedo, matizante óptico, blanqueadores, entre otros [13].

- **Circuito de aproximación:** Es una etapa extra de la preparación pasta y se concentra en el ingreso de la pasta del estanque de cabecera hacia depuradores ciclónicos de 3 etapas, cuyo flujo aceptado se dirige a un silo acumulador. Por último, la pasta es levantada por la bomba Fan Pump y pasa por una etapa de filtrado, dirigiéndose a la caja de entrada de la máquina papelera, donde ingresa tomando forma de acuerdo a la configuración de las vestimentas de la máquina.

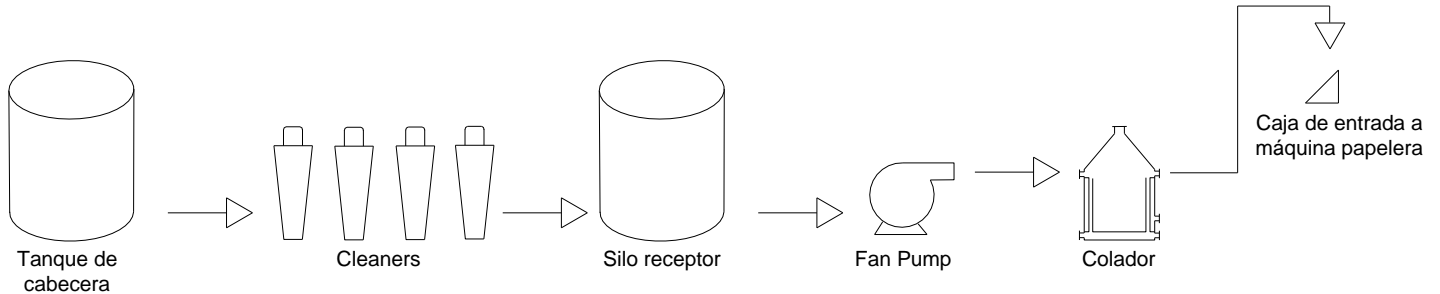


Figura 11: Esquema del circuito de aproximación de la pasta hacia la máquina papelera (Elaboración propia).

2.5.2 Proceso de secado

La etapa del secado en la máquina es clave debido a que remueve una gran cantidad de agua de la lámina de papel producido, otorgando propiedades de absorción y suavidad [14]. Dentro de la máquina papelera existen diversos mecanismos para eliminar el agua, a través de procesos de desgote y transmisión de calor.

2.5.2.1 Desgote mecánico

Proceso mecánico donde prensas y polines estrujan y desgotan agua de la pasta con ayuda de las vestimentas de la máquinas, en diferentes configuraciones. Este sistema involucra una baja cantidad de energía y se acompaña de un sistema de vacío que absorbe el agua del papel, haciéndola fluir desde el papel hacia los orificios a través de la tela. El aire con agua pasa a través de un separador, eliminando la humedad del aire y dirigiéndose seco hacia las bombas de vacío. El proceso de desgote elimina aproximadamente el 95% de humedad en la pasta.

El sistema de vacío de la MP2 contempla el uso de 2 bombas de vacío para la configuración Crescent Former y 7 para Atmos, debido a que se integran polines, prensas y cajas de succión diferentes. Estas bombas de vacío utilizan agua fría y limpia para formar un anillo hidráulico, formando un sistema similar a un pistón (desplazamiento positivo) capaz de succionar el aire desde la máquina, generando vacío y eliminando el agua hacia un pozo. El intercambio de calor realizado entre el aire caliente y el agua fría aumenta la temperatura del agua hasta los 40-45°C. El agua caliente alimenta una torre de enfriamiento para disminuir su temperatura y recircularla al mismo sistema de vacío. Esta torre contempla el uso de placas para reducir la temperatura del agua mediante transferencia de calor, y utiliza un ventilador donde el aire frío se calienta mediante convección, disminuyendo la temperatura del agua entre 10°C a 15°C.

2.5.2.2 Transmisión de calor

En el proceso de secado por calor existen 2 principales sistemas que tienen como objetivo eliminar el agua restante presente en el papel utilizando la transmisión de calor para calentar la hoja y evaporar el agua. Estos sistemas se dividen como el secado en la capota y en el cilindro Yankee, y operan de manera simultánea:

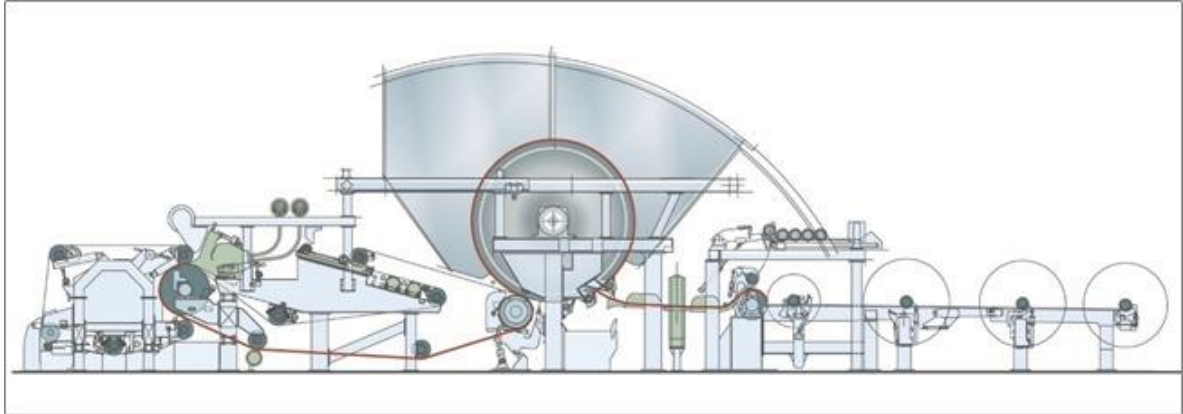


Figura 12: Diagrama del proceso de secado en una máquina papelera. El ingreso de la pasta ocurre en el sector izquierdo, mientras que la bobinación del papel ocurre en el lado derecho [15].

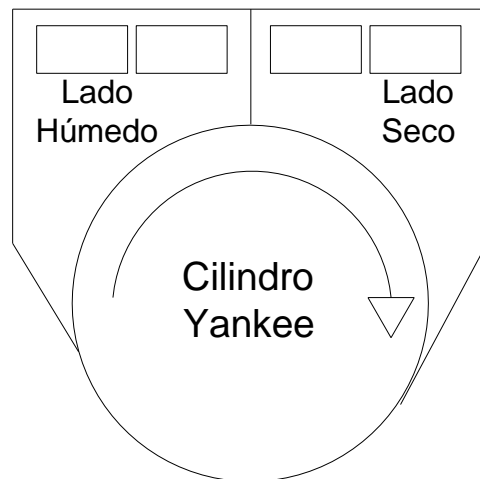


Figura 13: Esquema del proceso de secado con la capota (estructura superior) y el cilindro Yankee (Elaboración propia).

- Secado por capota: Este sistema utiliza aire caliente para evaporar el agua del papel mediante convección, el cual es calentado en cámaras de combustión. Este aire caliente se insufla a través de una serie de aspersores que van en dirección contraria a la hoja de papel a una gran velocidad.
- Secado en el cilindro Yankee: Este sistema contempla el uso de un cilindro de acero inoxidable de 4,5 metros de diámetro y 3 metros de largo, dispuesto de forma transversal en la máquina para transportar el papel desde la prensa hasta el raspador crepador. A medida que realiza el trayecto, dentro del cilindro se inyecta vapor a una alta temperatura, cuyo calor es transferido hacia el papel por medio

de la conducción, eliminando humedad presente en el papel y generando condensado debido al cambio de fase que sufre el vapor.

El esquema de la máquina se compone finalmente de ambos tipos de secado, donde el desgote extrae aproximadamente el 95% de humedad y el calor retira el 5% restante.

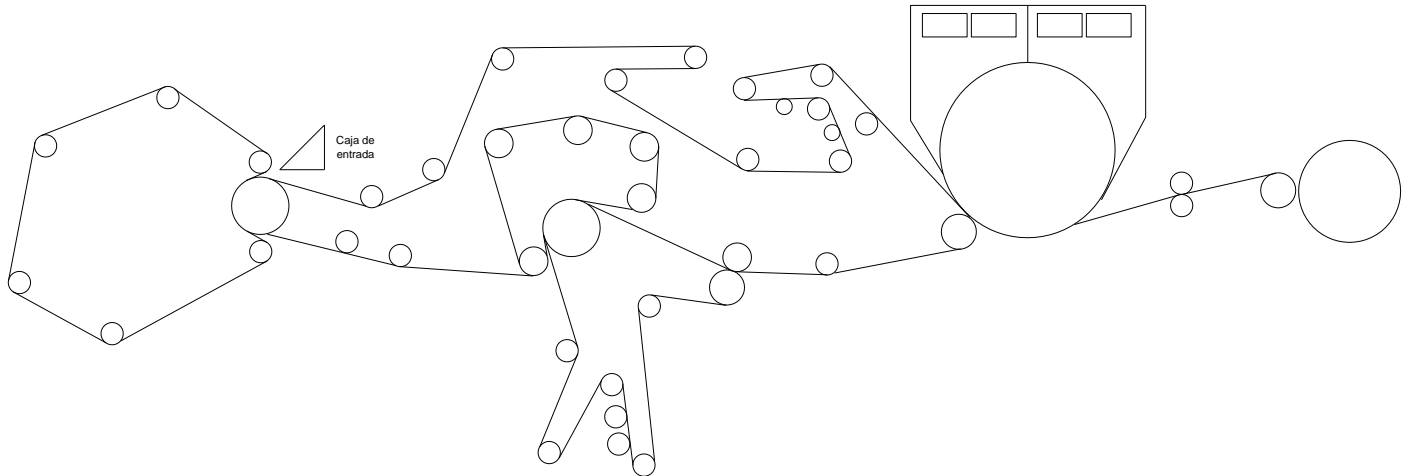


Figura 14: Configuración de la MP2, desde la caja de entrada hasta la generación del jumbo (Elaboración propia).

Al terminar el proceso de secado, el papel es bobinado y dispuesto como un Jumbo, listo para ser procesado en la etapa de conversión de rollos y doblados.

2.5.3 Conversión

Es la etapa donde un Jumbo producido por la máquina papelera genera un producto listo para la venta en el comercio. La conversión utiliza como materia prima un jumbo de papel, y dependiendo del tipo de producto que se desea elaborar, existen máquinas desenrolladoras que adaptan el papel a las máquinas procesadoras respectivas, las cuales pueden ser propias del proceso de productos enrollados o doblados [16]:

- Rollos: Se refiere a los productos en formato de rollos tales como el papel higiénico, toallas de cocina, entre otros. Además, el departamento de Rollos en Talagante elabora productos de doble hoja.

El jumbo ingresa a una de las 10 líneas de producción existentes en el área, donde cada una es especializada para un tipo de producto. El proceso de cualquier línea se resume en la siguiente figura:

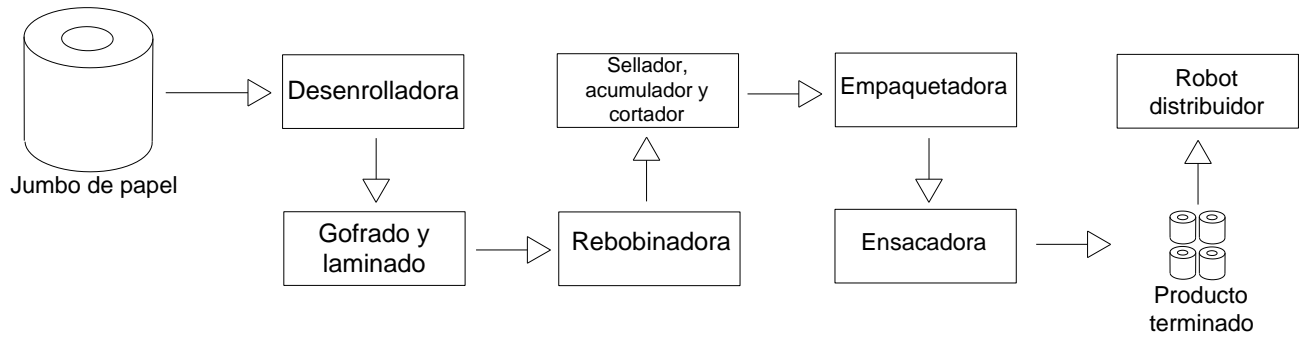


Figura 15: Esquema de la conversión de papel en productos con formato de rollos (Elaboración propia).

- **Doblados:** Se refiere a los productos en formato de papel doblado, tales como las servilletas, pañuelos, faciales, entre otros. El proceso se asemeja al propio del departamento de rollos, salvo que la diferencia reside en el uso de la plegadora, que procesa y dobla el papel, entregando un pack de hojas listo para ser envasado:

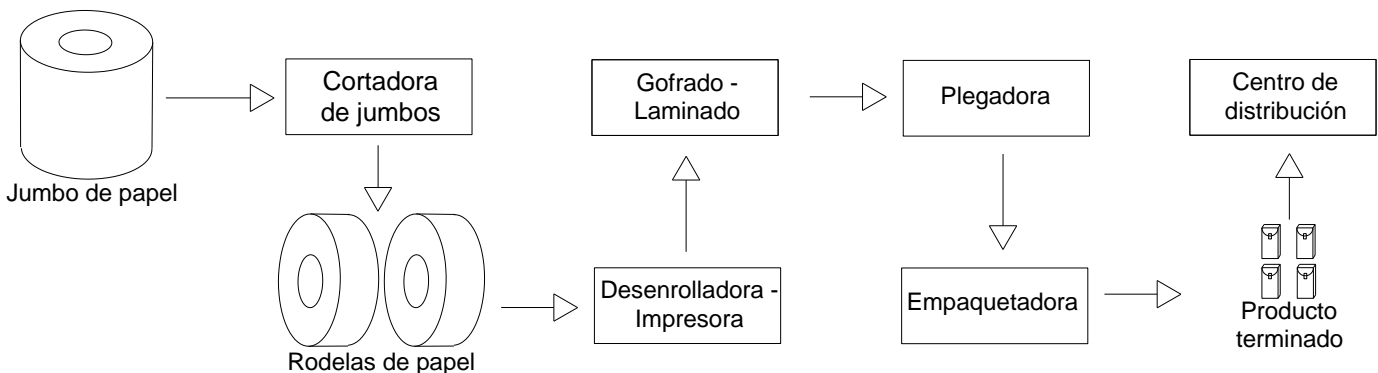


Figura 16: Esquema de la conversión de papel en productos con formato de doblados (Elaboración propia).

Una vez terminados los productos, se procede a trasladar en una tolva hacia la bodega de distribución o a través de grúas horquillas. En el centro de distribución se almacenan hasta que llegan los camiones transportadores, llevándolo hacia los respectivos clientes.

2.5.4 Tratamiento de aguas

Esta etapa constituye la clarificación de las aguas del proceso para reutilizarse en la misma máquina papelera, eliminando contaminantes y fibras gruesas obtenidas desde el proceso de desgote de la máquina papelera, canaletas, líneas de vacío, entre otros. Además, en la planta ubicada en Talagante existe una planta de tratamiento de efluentes, la cual recibe el agua contaminada y lodos provenientes de las 3 máquinas existentes, generando lodos sólidos residuales y obteniendo agua limpia entregada hacia el río Maipo:

- **Clarificación de aguas de máquina:** Corresponde a una serie de etapas que le otorgan una mejor calidad al agua utilizada en el proceso de fabricación, recuperando fibra útil y eliminando finos y partículas sólidas, enviándose hacia la

planta de tratamiento de efluentes. El agua resultante puede utilizarse como agua de lavado y regaderas en diversos equipos y en la propia máquina, así como la línea de aseo en la planta. Las etapas que constituyen la clarificación de aguas de máquina son:

- Fraccionamiento de fibras: Es una etapa que permite clasificar la fibra celulósica presente en un flujo de agua de acuerdo a su tamaño. Como resultado, se separa un flujo de fibra gruesa que puede ser recirculada en el proceso y un flujo de agua con partículas finas.
- Espesamiento: Esta etapa concentra un flujo de sólidos a partir de un flujo de fluidos con ayuda de discos giratorios que levantan el fluido y lo desgota. A la salida se genera un flujo de agua con finos y un flujo de sólidos (fibras principalmente) con una consistencia mayor.
- Clarificador de flotación por aire disuelto: Es un clarificador cuyo objetivo es separar de forma eficiente los sólidos suspendidos totales y partículas flotantes a partir de un flujo de aguas blancas. Este sistema genera burbujas de aire de tamaño pequeño utilizando aire comprimido, y al momento de unirse a un contaminante precipitado fomenta la flotación hacia la superficie, siendo retirado por medio de un cucharón mecánico giratorio [17]. Este método resulta para contaminantes sólidos, grasas y partículas flotantes, siempre y cuando se encuentre acondicionado adecuadamente con el uso de aditivos químicos. Como resultado se obtiene agua clarificada y lodos residuales que son enviados a la planta de efluentes.
- Filtro de arena: Es una etapa donde ingresa agua clarificada hacia un lecho de arena, cuya porosidad existente permite atrapar partículas de tamaño pequeño arrástrandolas hacia abajo. Así, a medida que el agua sube a través del equipo, se va limpiando de contaminantes, obteniendo agua superclarificada. El equipo cuenta con un sistema de lavado de la arena sucia, utilizando un sistema de flotación por aire disuelto en una celda de lavado pequeña. El agua limpia obtenida contiene baja cantidad de material particulado, ideal para el uso de regaderas que limpian las vestimentas de la máquina papelera.



Figura 17: Parte del circuito de clarificación de aguas. A la izquierda se encuentra un fraccionador de fibras, mientras que a la derecha se encuentra el clarificador.

- Tratamiento de efluentes: El flujo de aguas residuales finales se compone principalmente por agentes contaminantes propios del papel reciclado, uso de agentes químicos para el papel, entre otros [18]. A modo general, estas aguas pueden contener hasta 250 compuestos diferentes obtenidos desde todas las etapas de fabricación, y pueden clasificarse según el origen del contaminante, el cual puede ser la materia prima (lignina y taninos), blanqueado del papel (fenoles, dioxinas y furanos), entre otros.

Los lodos generados por las 3 máquinas papeleras se dirigen hacia la planta de efluentes a través de canaletas. En esta planta se realiza un tratamiento químico, biológico y mecánico para concentrar los lodos y obtener aguas claras y limpias que pueden descargarse hacia el río Maipo, bajo un control de contaminantes regidos por normas chilenas. Las etapas de este tratamiento son:

- Clarificación primaria: Recibe los lodos totales de las 3 máquinas papeleras, sedimentando partículas sólidas de gran tamaño. Como resultado se obtiene agua clarificada de calidad media, con microplásticos y residuos orgánicos pequeños. Las partículas grandes y residuos son eliminadas a través de un sistema de limpieza mecánico automático.
- Reactor biológico: Es un tanque de gran volumen que recibe el agua clarificada, donde se agregan agentes biológicos (bacterias) para degradar la materia orgánica presente en los residuos existentes y floculantes para residuos de tamaño pequeño. Se utilizan nutrientes para que las bacterias logren degradar la materia orgánica de manera completa. Posteriormente, la totalidad del flujo ingresa a una etapa de clarificación secundaria, con una concentración de material particulado bajo.
- Clarificación secundaria: Recibe el agua con bacterias, donde sedimentan los residuos floculados y los agentes biológicos del reactor. Se obtiene un

flujo de agua de gran calidad y baja turbidez, con una concentración de material particulado circundante entre 0 y 10 ppm. Este flujo de agua es descargado hacia el río Maipo.

- Prensado: Los lodos concentrados obtenidos desde la clarificación pasan a una etapa de prensado donde se desgotan hasta alcanzar una consistencia más sólida, con ayuda de una prensa de tela. Los lodos residuales finales se disponen en un camión que los traslada hacia un relleno sanitario.



Figura 18: Planta de tratamiento de efluentes de CMPC Talagante.

2.6 Agua en el proceso de fabricación de papel

2.6.1 Definición y tipos de agua en el proceso

El agua es un recurso vital para el desarrollo de la industria general, debido a sus propiedades físicas y químicas que otorgan una gran variedad de usos. Dentro de la industria papelera, el agua es utilizada para una gran cantidad de variables operativas dentro del proceso de producción de papel.

Para clasificar el tipo de agua usado en la totalidad del proceso, se define una nomenclatura básica para referirse a las aguas presentes en la máquina papelera de forma general, mencionada en la Sección 7 Glosario.

2.6.2 Usos del agua industrial en la planta de Talagante

A lo largo de la planta de Tissue Talagante, se divisan varios puntos donde es necesaria agua para operar y desarrollar sus procesos. El agua es obtenida a partir de napas subterráneas ubicadas debajo de la planta y es almacenada en tanques de 1200 m³ de volumen, siendo repartida a diferentes partes de la planta. El agua industrial obtenida se distribuye en una red representada por la siguiente figura:

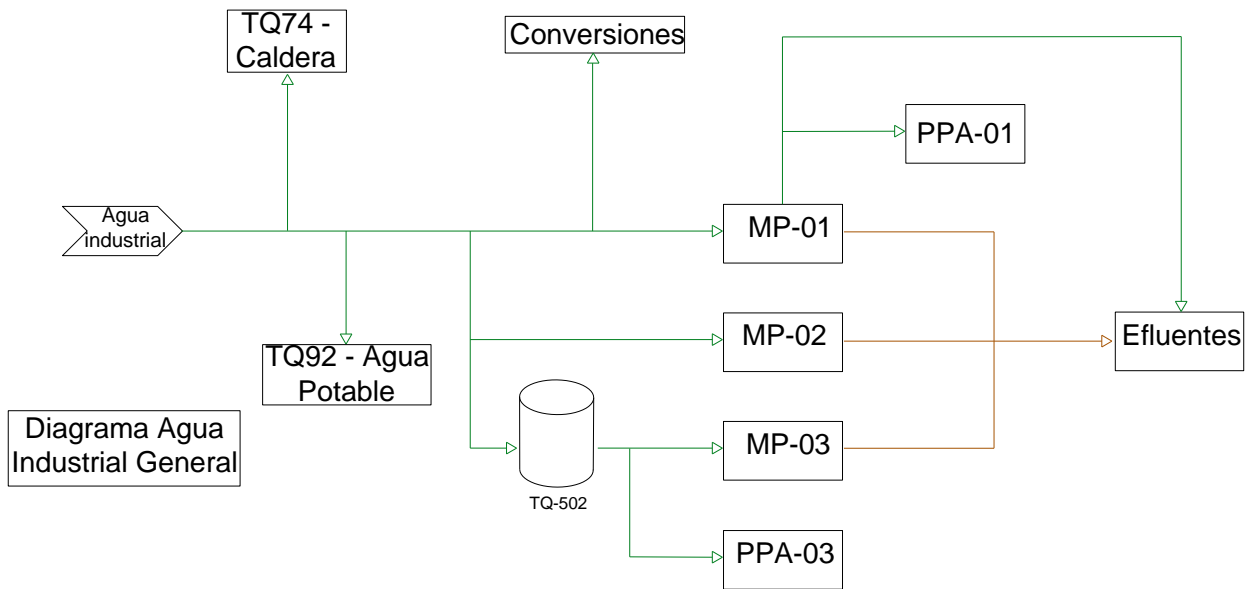


Figura 19: Diagrama del uso de agua en la planta de CMPC Tissue Talagante (Elaboración propia).

A través del diagrama anterior, se caracteriza el agua total definido a las siguientes zonas:

- Caldera: Es el agua que va hacia la planta térmica, en específico hacia la caldera, donde se transformará en vapor necesario para el proceso de secado en las máquinas y en la dispersión en preparación pasta. Previamente, este flujo de agua pasa por una etapa de osmosis inversa y ablandamiento para eliminar durezas y cargas iónicas.
- Agua potable: Es el agua que se dispone para servicios básicos hacia las personas que trabajan en la planta (baños, cocina, aseo en zonas administrativas, entre otros). Se obtiene como resultado de la mezcla del agua del pozo con agua blanda.
- Conversiones: Es el agua destinada al aseo y al sistema hidráulico mecánico de algunos equipos presentes en el departamento de conversión de rollos y doblados. Además, está vinculado con el riego del pasto de las instalaciones de la planta y de la limpieza de los clichés, gofradores que utilizan tintas para la impresión de algunos productos como servilletas y papel higiénico.
- Efluentes: Se utiliza agua industrial para la adición de agentes químicos al proceso de clarificación, regaderas para la limpieza de la tela en el prensado de lodos y para regar plantas y pasto. En ocasiones se utiliza para rociar los lodos hasta que envejecen.
- Preparación Pasta 1 y 3: Es el agua industrial destinada al área de preparación de la pasta para el proceso, utilizado principalmente para la dispersión de fibras (PPA1 distribuye pasta hacia la MP1 y MP2, PPA3 distribuye pasta hacia la MP3).
- Máquina Papelera 1, 2 y 3: Es donde se concentra el mayor consumo de agua total de la planta (sobre un 75%), y es dirigida hacia varios procesos y etapas en la fabricación del papel.

2.6.3 Usos del agua industrial en la máquina papelera N°2

El agua industrial cumple diversas funciones en la producción de papel, por lo que es conveniente realizar una clasificación, independiente si se fabrica papel tipo Crescent Former o Atmos. Dado que el objetivo de este estudio se enfoca en el uso del agua industrial en la máquina papelera N°2 (MP2), se mencionarán los usos exclusivos del agua en esta máquina observados en terreno, panel de control y planos de instrumentación:

- Agua que ingresa al proceso: Se refiere al uso del agua que ingresa al caudal de pasta (línea del proceso) de alguna manera u otra:
 - Entrada – Make Up a proceso: Corresponde al agua que es necesaria en un equipo cuando sucede un imprevisto o existe un agotamiento de agua dentro del circuito de agua blanca o clarificada. Esta agua reemplaza el agua que debe provenir de un equipo o etapa que no funcione de buena manera o se encuentre fuera de servicio. Además, se utiliza cuando el proceso cambia de configuración de papel, pues la fibra y agua utilizada desde el proceso anterior debe ser cambiada totalmente.
 - Aditivo: Es el agua que sirve como dilución y transporte para el ingreso de aditivos al proceso. Generalmente estos flujos son pequeños debido a que deben alcanzar concentraciones cercanas al 1% utilizando bajas dosis de aditivo. Los principales aditivos son el floculante, coagulante, entre otros.
- Agua como reguladora de temperatura: El principal uso de esta agua se centra en otorgar estabilidad térmica a algunos equipos mientras se encuentran en operación, cumpliendo la labor de la transferencia de energía entre el agua fría y un componente del equipo que necesita enfriarse. A diferencia de la categoría anterior, este uso de agua no ingresa como tal al flujo del proceso. Los usos existentes asociados son:
 - Sistema Hidráulico: Corresponde al agua fresca utilizada para operar el sistema hidráulico de un equipo o etapa en particular, utilizando la característica de su temperatura baja, circundante entre los 18°C a 23°C. El agua de salida se encuentra a una temperatura levemente elevada debido a que existe un intercambio de calor en el motor del equipo (generalmente se enfría el aceite del motor) o etapa involucrada, pero mantiene su pureza.
 - Sello mecánico: El sello mecánico es una configuración interna que poseen algunas bombas centrífugas para mantener una temperatura estable de operación. Si no hubiese agua de enfriamiento, la fricción de los alabes con la fibra, pasta o partículas presentes en el fluido elevado provocaría un aumento de calor en la superficie de la bomba, provocando fallas de funcionamiento y estabilidad.
La mayoría de las bombas en el proceso de la máquina papelera cuenta con un sistema de empaquetamiento interno el cual entrega autonomía con

respecto al control de calor emitido por la misma bomba, sin embargo, aún existen algunas bombas que necesitan agua de sello para mantener la temperatura de operación estable.

- Otros: Es el uso de agua que no corresponde a ninguna categoría anteriormente mencionada.

Además de clasificar los puntos de consumo de agua en la planta, es necesario verificar caso a caso si existe alguna posibilidad de modificar o eliminar el consumo de agua existente, y así realizar el estudio de reducción de agua de manera eficiente. Así, se define un criterio para cada categoría de la lista previamente mencionada:

Tabla 2: Justificación de modificación de variables según definición del uso de agua.

Categoría	Variables modificables	Justificación
Entrada – Make Up	Sí	Debido a que la entrada tipo Make Up se refiere a un consumo esporádico generado por una falla o un bypass entre etapas, solucionar el problema de origen permitiría cerrar la conexión o disminuir el consumo de manera indefinida, dependiendo del mantenimiento y seguimiento que se realice al problema presentado.
Aditivos	No	Las empresas proveedoras de aditivos definen un caudal de agua óptimo para el buen funcionamiento de los agentes químicos que entregan. En base a lo anterior, no se puede modificar el caudal de agua ya que afectaría la regularidad del proceso con respecto a los aditivos que se integran. La única forma de eliminar un consumo de este tipo es cuando el sistema no se encuentra funcionando de manera permanente.
Sistema Hidráulico	Eventualmente	El caudal de agua utilizado para este tipo de sistema no puede ser reemplazado por agua clarificada o de circuito, debido a que los sistemas de intercambio de calor son sensibles a la presencia de partículas en el agua y son propensos a taparse e interferir en la transferencia de calor entre el agua y el aceite. Por otro lado, si los flujos de agua son reducidos, el aceite que utilizan los motores no se enfriará lo suficiente, generando problemas de funcionamiento en el motor asociado. Sin embargo, dependiendo de la configuración del sistema de intercambio de calor, es probable sugerir una modificación para reducir su consumo a través de un sistema de control por medición de temperatura.
Sello Mecánico	Eventualmente	La mayoría de las bombas centrífugas del proceso utiliza un sistema de empaquetamiento interno para mantener una temperatura de operación estable mientras levantan el fluido,

		sin necesidad de utilizar el sello mecánico. Sin embargo, existen bombas que utilizan un sello mecánico el cual requiere agua de manera continua.
Otros	Eventualmente	Depende del caso que se presente.

2.7 Clarificación de aguas del proceso

La clarificación es la etapa clave para la recuperación de fibras al proceso y de la limpieza y reutilización del agua blanca generada por la máquina papelera. Para un mejor entendimiento de este proceso, se describen los equipos que conforman este sistema:

- **Fraccionador de Fibras:** Este equipo se dedica a separar fibras de celulosa que contiene un flujo de fluido de acuerdo a su tamaño. El principio de funcionamiento consiste en que el flujo de entrada es rociado a una canasta de criba giratoria de rotación lenta, donde los orificios de la malla de criba tienen un tamaño de 150 micras. Las partículas grandes son retenidas en la malla y empujadas por un rociador de alta presión hacia adentro, de manera de limpiar la malla y entregar un flujo de fibras grandes hacia la siguiente etapa. Por otro lado, la fracción fina logra atravesar la malla y es enviada directamente hacia un tanque receptor de fibras cortas. El equipo funciona en base a un motor eléctrico que permite realizar el movimiento giratorio de la malla, mientras que las regaderas de agua de alta presión permanecen fijas y destapan las mallas a medida que van girando.

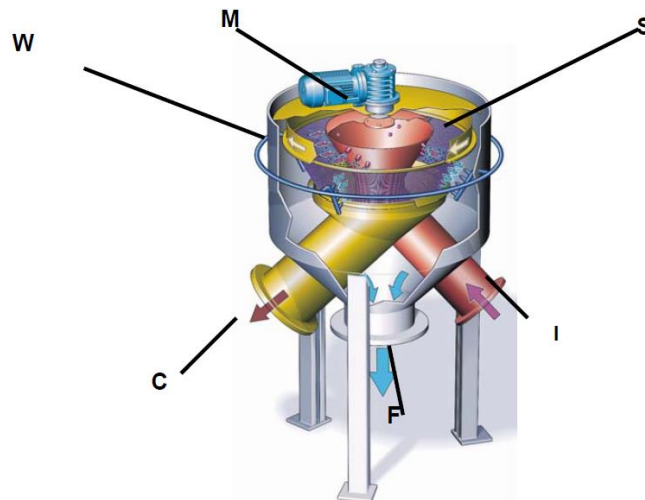


Figura 20: Esquema del fraccionador de fibras. (I) es el ingreso del flujo, (C) es el concentrado de fibras útiles, (S) es la canasta de criba, (M) es el motor de giro y (F) es el agua con partículas finas.

- **Espesador:** El espesador es un equipo cuyo rol reside en obtener la mayor cantidad de sólidos dentro de un flujo líquido. Este equipo opera con el uso de discos de acero inoxidable filtrantes giratorios posicionados de manera vertical, los cuales se constituyen de una malla cuyos orificios tienen una abertura aproximada de 80 micras. A medida que el disco gira, el agua escurre a través de la malla, atrapando las partículas hasta generar una torta de sólidos que es removida con

la ayuda de toberas (regaderas) de agua de alta presión ubicadas al interior del equipo. Los lodos contienen una alta cantidad de sólidos, mientras que el agua obtenida contiene partículas finas. El accionamiento de los discos es realizado gracias a un motor reductor que modifica la velocidad de giro hasta alcanzar la óptima, entre 30 a 80 revoluciones por minuto.

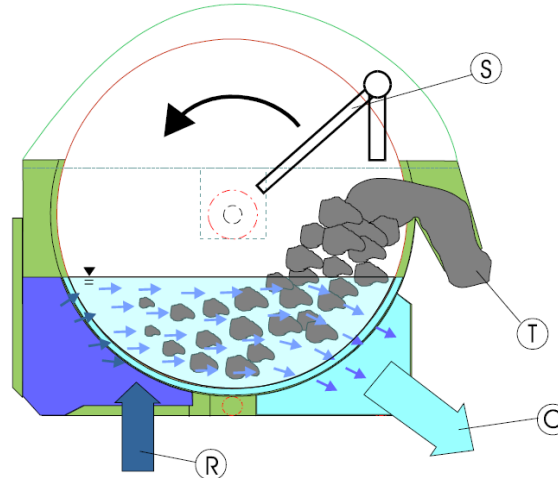


Figura 21: Esquema del espesador, donde el flujo ingresa por debajo (R), obteniendo agua con partículas finas (C) y partículas sólidas concentradas (T), con ayuda de las regaderas (S).

- Clarificador: Es un clarificador tipo DAF (flotación por aire disuelto), el cual separa de forma eficiente los sólidos suspendidos totales y partículas flotantes desde un flujo de aguas blancas. Este sistema genera burbujas de aire de tamaño pequeño con ayuda de aire comprimido, las cuales atrapan los contaminantes y ayuda a que floten hacia la superficie. Este equipo cuenta con el apoyo de agentes químicos coagulantes y floculantes para agrupar a las partículas finas, contribuyendo a la flotación para que el cucharón giratorio permita removerlas del proceso. Del equipo se obtiene un flujo de agua clarificada dirigida hacia un tanque receptor y lodos de gran consistencia enviados hacia la planta de efluentes [17].

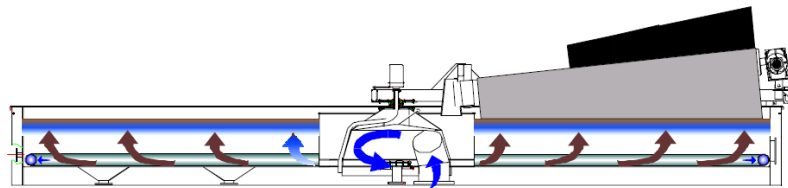


Figura 22: Imagen transversal del clarificador DAF, donde el ingreso del flujo se realiza en el medio del equipo. El retiro de los lodos se realiza con el cucharón (color negro).

- Filtro de arena: Es un equipo que consta de un tanque de metal compuesto de 2 secciones transversales diferentes, una parte cilíndrica y una parte cónica, el cual es relleno con arena de cuarzo redonda de 2-3 [mm]. El fundamento de operación de este filtro reside en la porosidad que tiene la arena para atrapar partículas de un tamaño establecido desde la corriente de agua de alimentación,

donde estas partículas corresponden a fibras u otros elementos contaminantes pequeños, cuya carga máxima aceptable es de 100 ppm. El filtrado ocurre cuando el flujo de agua de alimentación ingresa aproximadamente en la mitad de la altura del equipo, donde el agua se limpia a medida que se eleva, y los contaminantes quedan atrapados en la arena, sedimentando por gravedad. Este sistema se compone de una limpieza continua de la arena, donde unos impulsores neumáticos levantan la arena contaminada ubicada al fondo del equipo, dirigiendo el flujo hacia una celda de lavado que elimina las partículas desde la arena con ayuda de un flujo de aire a contracorriente, generándose agua sucia que se dirige a un tanque de recepción y arena limpia descargada a la parte superior del equipo. El agua clarificada rebalsa en la parte superior del equipo, dirigiéndose a un tanque de recepción a través de una cañería. En el circuito existen 2 filtros de arena, equipos primordiales pues el agua generada debe poseer una gran calidad de clarificación, con una baja presencia de partículas tanto finas como gruesas para que pueda ser usada como agua de regaderas de alta presión en la máquina papelera.

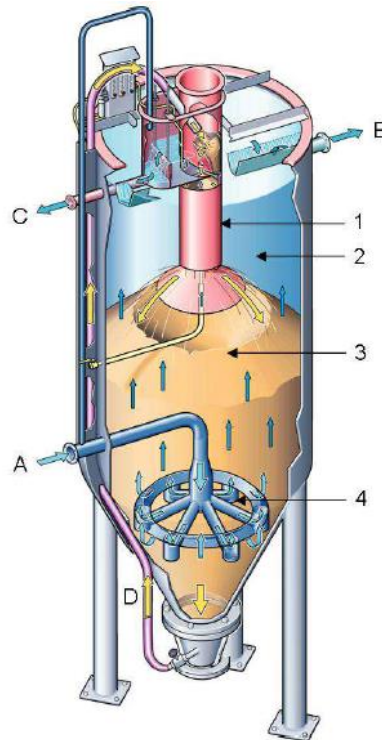


Figura 23: Esquema del filtro de arena. El ingreso del flujo se realiza en (A), el agua clarificada se dirige a (B) y el agua sucia se representa por (C). El sistema de levantamiento de la arena sucia se realiza en (D).

Con los equipos mencionados, el circuito de clarificación puede entregar un flujo de fibras útiles al proceso y un flujo de agua para utilizarse en la máquina papelera, representado por la siguiente figura:

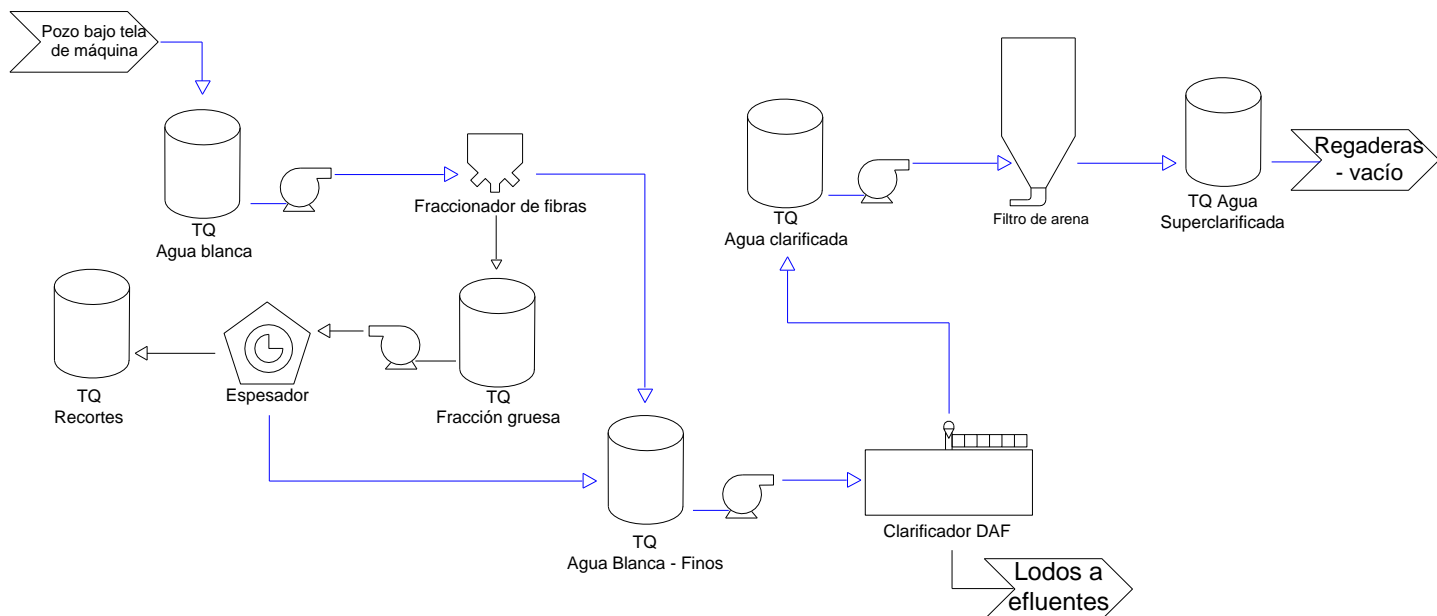


Figura 24: Circuito de clarificación general en planta de fabricación.

2.8 Microbiología en el agua clarificada

Las plantas de tratamiento biológico de aguas residuales tienen como fundamento el uso de microorganismos tales como bacterias y hongos que son capaces de eliminar los componentes orgánicos presentes en el agua, basado en que el desarrollo de estos microorganismos necesita de una fuente de carbono para lograr la supervivencia. Los organismos se clasifican en grupos de acuerdo a la forma de subsistir en un hábitat, tales como aerobios, anóxicos y combinados [19].

El proceso de tratamiento de los lodos generados en la planta de CMPC Talagante consiste en un tratamiento biológico aerobio, con el uso de lodos activados capaces de reducir la cantidad de materia orgánica en el agua con el uso de microorganismos varios, los cuales se encuentran en recirculación entre el reactor biológico y la clarificación secundaria (Ver Sección 2.5.4 Tratamiento de aguas). Sin embargo, existen algunos microorganismos primordiales que pueden encontrarse a la salida de la planta de tratamiento, los cuales se clasifican como:

- **Coliformes fecales y totales:** Se denomina a un grupo de especies bacterianas que indican grado de contaminación del agua, y se encuentran de manera natural en el ser humano, suelos, semillas y plantas. Los coliformes se encuentran en mayor cantidad en la capa superficial del agua o bien, en los sedimentos generados por la misma. Los coliformes totales se refiere a las Enterobacterias lactosa-positivas, las cuales fermentan la lactosa de manera rápida. De este grupo se encuentran

los coliformes fecales, definidos en géneros como la Escherichia Coli, Enterobacter y Klebsiella.

Dado que en una planta de tratamiento de aguas se tiene como objetivo degradar la materia orgánica presente en el agua, la aparición de este tipo de microorganismos debiese ser pequeña en el flujo de agua clarificada, pues posee DBO en baja cantidad [20].

- Bacterias sulfato-reductoras: Estas bacterias también son conocidas como bacterias productoras de ácido sulfhídrico (H_2S) y su mecanismo de nutrición se basa en la obtención de energía reduciendo compuestos con azufre, incluyendo compuestos orgánicos (aminoácidos azufrados) y compuestos inorgánicos con azufre oxidado (en forma de sulfatos, sulfitos, entre otros), frecuentemente en un ambiente anaerobio.

Las bacterias sulfato-reductoras (SRB) son de carácter quimiolitótrofas, que utilizan sulfato como el aceptor final de electrones al momento de degradar la materia orgánica, reduciendo el sulfato disponible. Estas bacterias se destacan por ser anaerobias estrictas y porque pueden utilizar diversos compuestos como donadores de electrones (azúcares, aminoácidos, ácidos mono carboxílicos, alcoholes y aromáticos), además de que los microorganismos que reducen la mayor cantidad de diferentes aceptores finales de electrones, incluyendo compuestos inorgánicos del azufre [21].

Entre las principales consecuencias de la presencia de estas bacterias en el agua se encuentra la generación de ácido sulfhídrico (H_2S), el cual posee la capacidad de corrosión en metal (hierro), afectando tuberías y equipos varios.

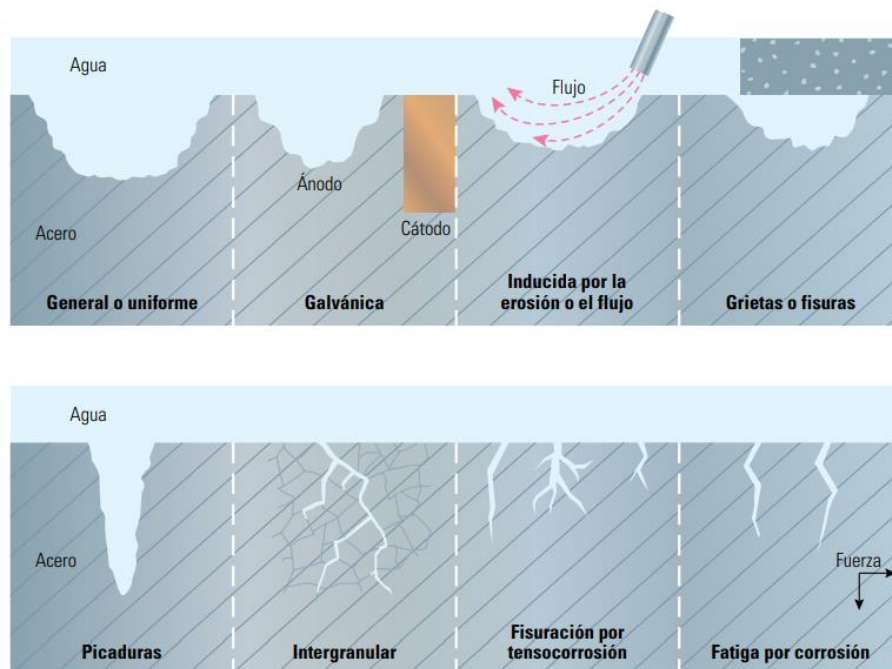


Figura 25: Formas de corrosión del ácido sulfhídrico al acero [22].

- Bacterias filamentosas: Las bacterias más frecuentes son del género *Sphaerotilus*, las que aparecen en ambientes anaerobios con baja concentración de nutrientes, y con presencia de sustratos fácilmente solubles, como ácidos orgánicos y azúcares simples. La característica de los filamentos presenta un problema debido a que estas bacterias son capaces de oxidar sales de hierro, formando corrosión [23]. Además, dada su capacidad de formar flocs debido al entrecruzamiento de los filamentos de las bacterias, generando cúmulos de baja densidad, lo que representa una baja sedimentabilidad. Esto se traduce que los flocs son arrastrados por la corriente del flujo de agua, generando depósitos y acumulación de suciedad en las cañerías [24].

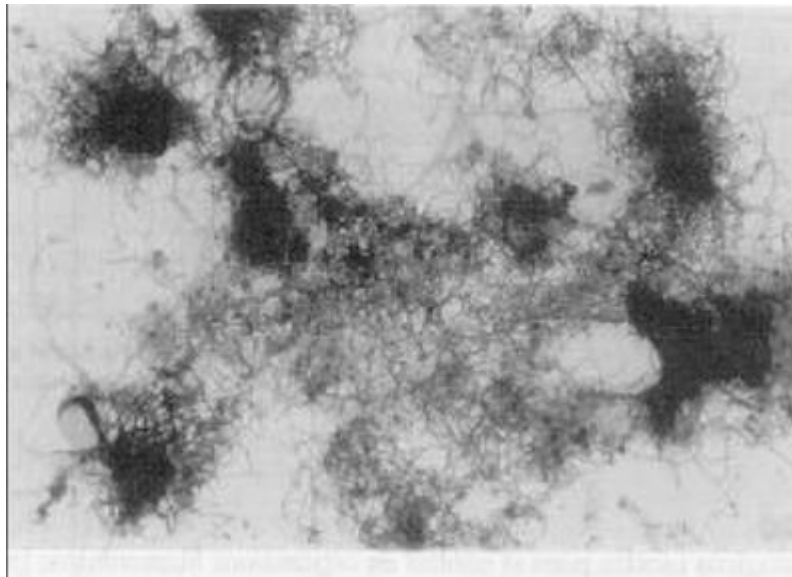


Figura 26: Acumulación de bacterias filamentosas dado el entrecruzamiento de los flagelos [25].

- Microalgas: Estos microorganismos se definen como eucariotes, autótrofos, fotosintéticos y productoras de materia orgánica en ambientes acuáticos. Estos organismos utilizan el dióxido de carbono, amoníaco, nitratos y fosfatos como fuente de nutrientes, con ayuda de la luz solar. Sin embargo, las microalgas pueden desarrollar un metabolismo quimiosintético con ausencia solar, consumiendo el oxígeno disuelto en el agua [25]. La aparición en las plantas de tratamiento de aguas se debe a la exposición solar, la presencia de nutrientes en forma de nitratos y fosfatos, pH adecuado (cercano a 8) y temperaturas entre 28°C y 35°C [26].

3 Diagnóstico del agua en la Máquina Papelera N°2

3.1 Puntos de consumo actual en la planta de Talagante

Para iniciar los análisis de los consumos de agua industrial en la máquina 2, es necesario realizar un balance másico del agua total de la planta, para tener una estimación del consumo actual de agua en la máquina. Así, se realiza una estimación de los flujos de agua totales, de acuerdo al diagrama representado por la Figura 19.

Debido a que la máquina papelera N°2 produce 2 tipos de papel, se realizó el análisis de flujos en los 2 regímenes de procesos para diferenciar los consumos de agua entre un tipo de papel y otro, entregando como resultado parcial la siguiente tabla de datos:

Tabla 3: Flujos de agua usada a nivel planta, medidos en el año 2018.

Medición	Medición en Crescent Former (23 al 27 de Noviembre)		Medición en Atmos (10 al 21 de Diciembre)	
	Caudal estimado en [L/min]	Caudal estimado en [m ³ /día]	Caudal estimado en [L/min]	Caudal estimado en [m ³ /día]
Pozo subterráneo	6437	9269,3	6517,5	9385,2
TQ74 – Caldera	488,3	703,2	430,8	620,3
TQ92 – Agua potable	324	466,6	324	466,6
Conversiones	No estimable	No estimable	No estimable	No estimable
MP1	2200,4	3168,58	2155	3103,2
PPA1	20	28,8	20	28,8
Efluentes	304,5	438,48	445	640,8
MP2	930,3	1339,63	965	1389,6
MP3+PPA3	1949	2806,56	2110	3038,4

3.2 Puntos de consumo actual en la máquina papelera N°2

A partir de visitas en terreno, planos y diagramas en paneles de control en la máquina, se obtuvo información específica del uso de agua industrial en la máquina, utilizada a lo largo del proceso de fabricación de papel. Se tiene el alcance de que el proceso observado inicia después del dispensor, perteneciente al área de Preparación Pasta y la disgregación y preparación de la pasta de recortes propios del proceso, iniciado con el *pulper* debajo de la máquina.

Para ello se confeccionaron varias tablas de datos, que resumen todos los puntos de consumo de agua en la máquina, clasificado con la categoría mencionada en la sección 2.6.3 Usos del agua industrial en la máquina papelera N°2, la vigencia de la conexión, referida a si se utiliza actualmente dicha conexión o no, área que pertenece en el proceso, forma de medición y flujo de agua utilizado, para la configuración Crescent Former y Atmos respectivamente. Dicha información se encuentra en el Anexo A: Consumos de agua industrial en MP2.

3.3 Metodologías para la estimación de flujos

Al tener conocimiento de los puntos de consumo de agua en la MP2, se procede a elaborar una metodología para saber la magnitud de los flujos requeridos por este proceso. A partir de lo anterior, se definen diversas estrategias de medición que permiten entregar datos fidedignos acerca de los caudales de agua usados en el proceso:

- **Medición en balde:** Medición de un volumen de agua vertido a un balde en un tiempo cronometrado. Esta metodología se utilizó principalmente para estimar flujos de agua pequeños en algunos equipos que utilizan un sistema hidráulico, cuyas mangueras de salida de agua eran de fácil acceso.
- **Medición en panel:** Esta medición se realiza observando el panel de control y fue utilizada para estimar el flujo de agua consumida como forma de Make Up por algunos tanques (ver Anexo D: Cálculo de flujo de agua normalizado). Los pasos de la medición en un tanque fueron los siguientes:
 - Averiguar el volumen del tanque.
 - Verificar que la conexión de agua de Make Up se encuentra abierta y que es la única que alimenta al tanque receptor.
 - Observar la hora exacta desde el momento de la apertura.
 - Anotar el nivel porcentual del tanque previo a la apertura del agua industrial.
 - Anotar el nivel porcentual máximo que alcanza el tanque antes de que la válvula de agua de Make Up se cierre.
 - Calcular el volumen de agua agregado con las diferencias de nivel porcentuales.
 - Observar la hora exacta desde el momento de una nueva apertura del agua industrial, para estimar un periodo de tiempo el cual se requiere agua por día.
 - Estimar el volumen de agua utilizado por la bomba asociada al tanque durante el tiempo de apertura de la válvula.
 - Dividir el volumen estimado por un periodo de tiempo, obteniendo un flujo de agua aproximado total.
- **Medición con flujómetro:** Esta metodología fue la más utilizada para obtener los caudales de agua tanto a nivel de planta como a nivel de máquina papelera. Esta medición consiste en el uso de un instrumento móvil no invasivo denominado flujómetro de ultrasonido, el cual utiliza sensores que deben ser adosados a las cañerías donde se desea saber el flujo de agua. Este instrumento utiliza el principio del efecto Doppler, donde un sensor emite una señal hacia otro sensor ubicado de manera diametralmente opuesta en una cañería, y dado el movimiento generado por el fluido, la frecuencia de la señal varía entregando una estimación de la velocidad del fluido de acuerdo a características de la tubería, como su diámetro interno, material, norma ANSI, tipo de fluido, etc.
Para corroborar la correcta medición del flujómetro, se midió un flujo de fluido cuya cañería poseía un flujómetro online, observando simultáneamente la medición del

flujómetro instalado y la medición del flujómetro móvil, el cual entregó un error del 1% para una calidad de señal emitida y recibida ponderada entre un 75% y un 91%. Esta calidad de señal se considera aceptable para todas las mediciones realizadas con este flujómetro móvil.

- Medición con flujómetro instalado: Esta medición consiste en observar la pantalla de un flujómetro asociado en el mismo equipo que se desea analizar. Esta medición se realizó principalmente en equipos asociados a los aditivos del proceso.
- Medición por estimación de periodo: Se utiliza el volumen del tanque y las veces que se llena por día para estimar el flujo de agua, dependiendo de la frecuencia de uso.

Con los tipos de medición clasificadas, se procede a decidir qué tipo de medición se utilizará para cada consumo existente de la máquina, representado por la Tabla 36.

3.4 Resultados principales

Realizando las mediciones pertinentes a las conexiones mencionadas en la Tabla 36, se obtiene un balance másico de agua total en el proceso de la MP2, entregando el diagrama final del circuito con sus respectivas conexiones, además de los flujos totales y su respectivo error total. Las tablas de datos son extensas, por lo que están ubicadas en el Anexo A: Consumos de agua industrial en MP2:

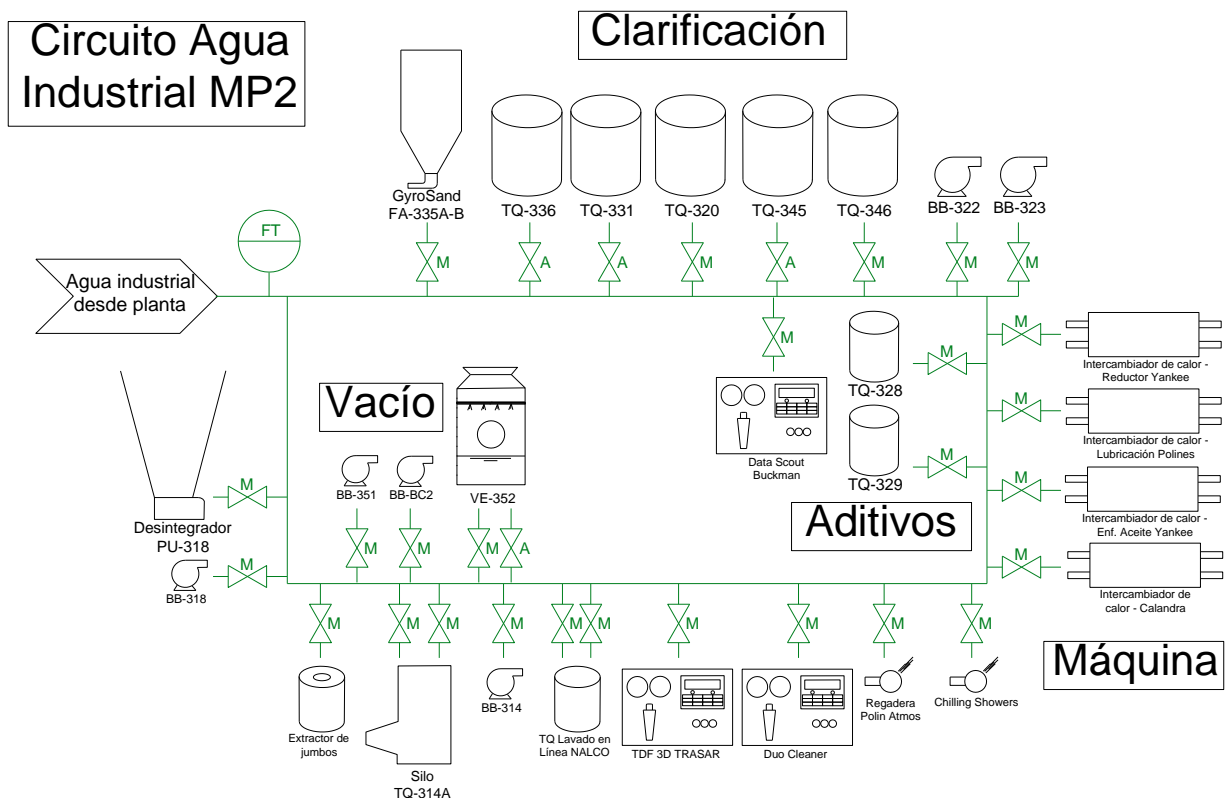


Figura 27: Circuito de agua industrial final de la MP2 con las conexiones existentes (Elaboración propia).
M se refiere a apertura manual, mientras que A se refiere a apertura automática.

Una vez definidos los valores globales y particulares para el agua industrial en la MP2, se procede a calcular el error total, comparado entre la suma de cada flujo con el inicio de la cañería principal, además de estimar el consumo específico de agua industrial por tonelada de papel producido para cada tipo de papel (comparando los datos de la Tabla 3 y Tabla 37):

Tabla 4: Balance global de agua en la MP2 con el error asociado a la fabricación de papel Crescent y Atmos.

Flujos totales	Flujo en Crescent	Flujo en Atmos
Balance másico [L/min]	909,93	1019,83
Cañería principal [L/min]	930.3	965
Error %	2,2%	5,4%

Además, los siguientes gráficos representan el consumo de cada área del proceso en el consumo global, para ambas configuraciones de papel:

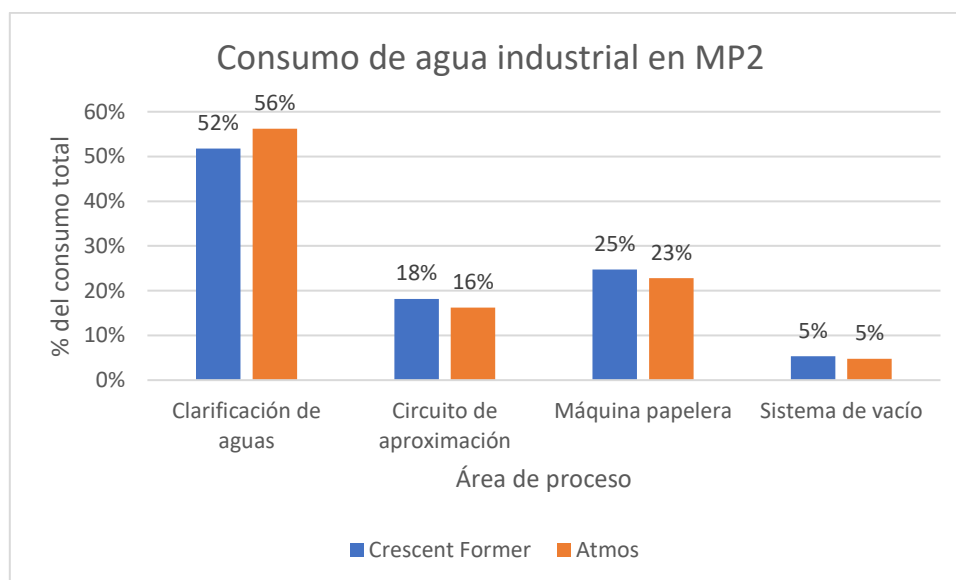


Figura 28: Magnitud de consumo de agua según área de proceso de la MP2.

Resumiendo la Tabla 37, los principales consumos se registran en la siguiente tabla:

Tabla 5: Principales consumos de agua registrados en el proceso de la MP2 (resumen de la Tabla 37).

Conexión	Categoría	Ubicación en proceso	Flujo [L/min] en Crescent	Flujo [L/min] en Atmos
TQ336 – Agua Super Clarificada	Entrada - Make Up	Clarificación de aguas	450,00	552,50
Enfriador de Aceite Yankee	Sistema Hidráulico	Máquina papelera	119,50	113,50

Despiche Silo TQ-314	Entrada – Make Up	Circuito de aproximación	95,50	95,50
Reductor Yankee	Sistema Hidráulico	Máquina papelera	57,20	57,60
BB314 – Bomba Centrífuga	Sello Mecánico	Circuito de aproximación	49,60	49,60
Calandra	Sistema Hidráulico	Máquina papelera	37,20	37,20

En vista de lo anterior, se define que el mayor consumo de agua es asignado al tanque TQ-336, ubicado en la clarificación de aguas. Este consumo alcanza el 49,5% del uso del agua total, convirtiéndolo en objetivo de estudio dado que el consumo tipo Entrada – Make Up puede ser manipulable. Posteriormente, el consumo en el enfriador de aceite del yankee y el reductor del Yankee no pueden modificarse debido a que pertenecen a un sistema hidráulico con un intercambiador de calor, clasificado como variable no manipulable. Siguiendo con la jerarquización y categoría del uso del agua, se estudia de manera puntual la apertura del despiche del silo TQ-314, y por último, se investigará el caso del sello mecánico de la bomba BB-314, el cual puede ser reemplazado por un sistema de empaquetamiento interno que no utiliza agua, y analizar la situación de la Calandra.

3.5 Consumos específicos de cada máquina papelera

Utilizando los flujos de agua consumidos por máquina, se estimaron los consumos específicos de agua en particular donde el consumo específico de agua de cada máquina se obtiene dividiendo el flujo de agua usado por la producción promedio diaria (Ver Anexo B: Producción diaria de papel):

Tabla 6: Consumos específicos de agua en cada máquina papelera.

Máquina Papelera	Consumo de agua [L/min]	Consumo de agua [m³/día]	Producción promedio diaria [ton/día]	Consumo específico [m³/ton]
MP1	2200	3168	70,54	44,91
MP2 - Crescent Former	909,93	1310,3	73,87	17,74
MP2 - Atmos	1019,83	1468,56	34,18	42,96
MP3	2100	3024	134,35	22,51
Promedio por máquina	-	-	-	32,03

Finalmente, se observa que el consumo promedio corresponde a 32 [m³ agua/ton papel], valor similar al entregado por la planta de agua.

4 Estudio de alternativas para la reducción del consumo de agua

4.1 Metodología general para la reducción de consumo de agua

Una vez obtenido el diagnóstico del problema en la planta, se elabora un esquema que permita definir líneas de acción para dar solución a los problemas existentes, basado de manera genérica. Siguiendo la metodología de la Sección 2.2 Sustentabilidad empresarial y política de medioambiente de CMPC, se elabora una estrategia de reducción y de reciclaje de agua, entregando un mayor énfasis a la primera, pues tiene una mayor prioridad en la pirámide invertida de la sustentabilidad y en los objetivos de trabajo.

Para el estudio de reducción de agua, utilizando las variables definidas como manipulables, se procede a intervenir operacionalmente o bien, a través de un estudio de las variables de diseño de una etapa, tal como se observa en el siguiente esquema:

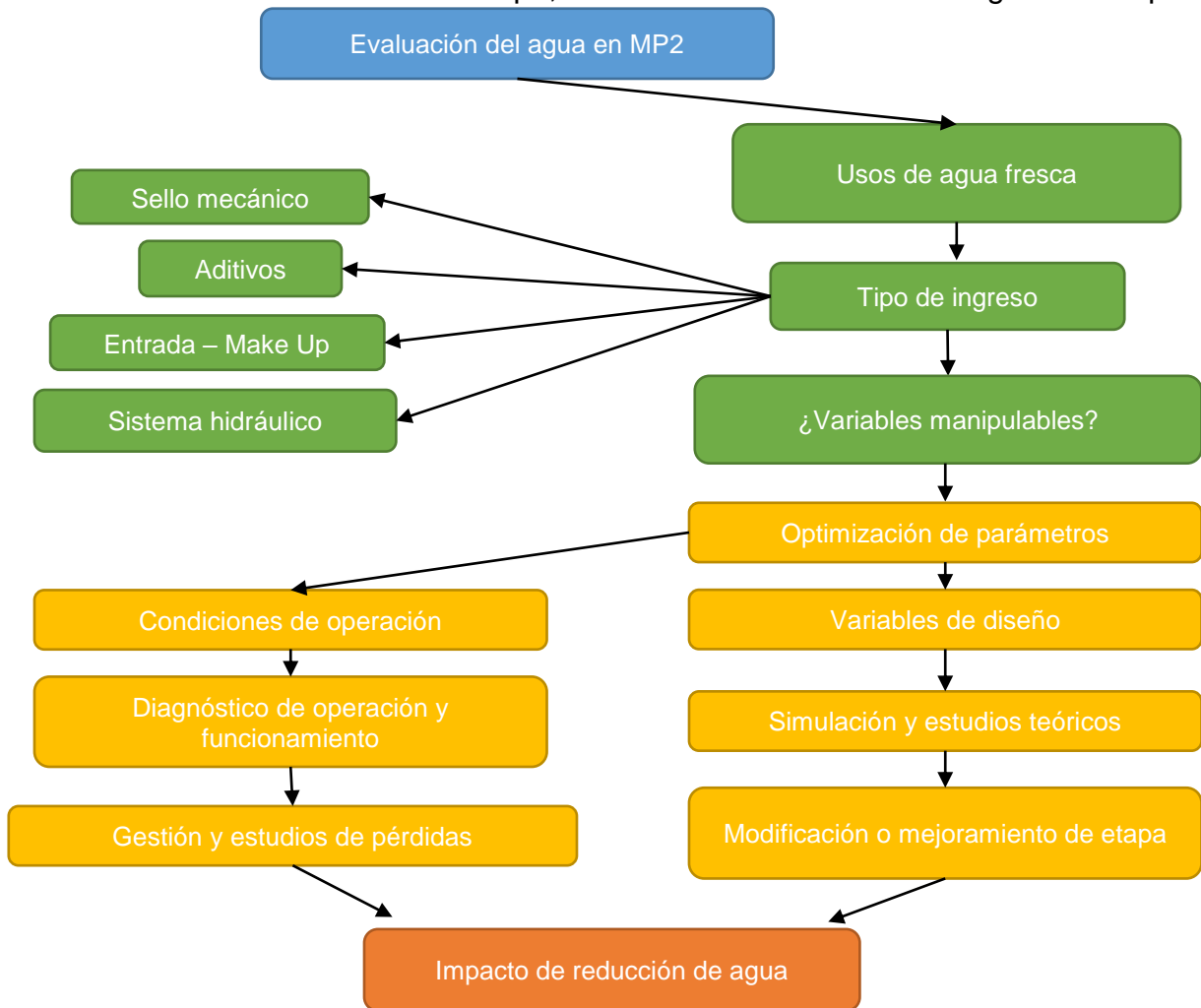


Figura 29: Metodología general para la resolución de los problemas asociados al consumo de agua en el proceso de fabricación (Elaboración propia).

Por otro lado, se define una estrategia para el reciclaje del agua específico, orientado en particular al agua producida en la planta de efluentes.

Con la metodología propuesta, se analizan los problemas existentes con mayor profundidad, buscando soluciones a la operación del proceso de clarificación relacionado al tanque TQ-336 (ver Sección 3.4 Resultados principales) y posteriormente, se revisará de manera puntual el despiche del tanque TQ-314, el consumo asociado a la bomba BB-314 y el uso en la calandra.

4.2 Investigación del consumo de agua industrial en clarificación

Al observar la Tabla 5, es claro notar que el principal problema del sobreconsumo de agua reside en el circuito de clarificación de aguas, representado por el consumo de agua industrial por el tanque TQ-336. El origen del problema radica en una falla de operación presente en el circuito de clarificación de aguas, relacionado a que existen algunos equipos que se encuentran fuera de servicio, tales como el espesador, el fraccionador de fibras y los filtros de arena. A modo de resumen, se confecciona un diagrama de Ishikawa el cual detalla las causas del no funcionamiento de dicha fracción de la clarificación de aguas, plasmado en la siguiente figura:

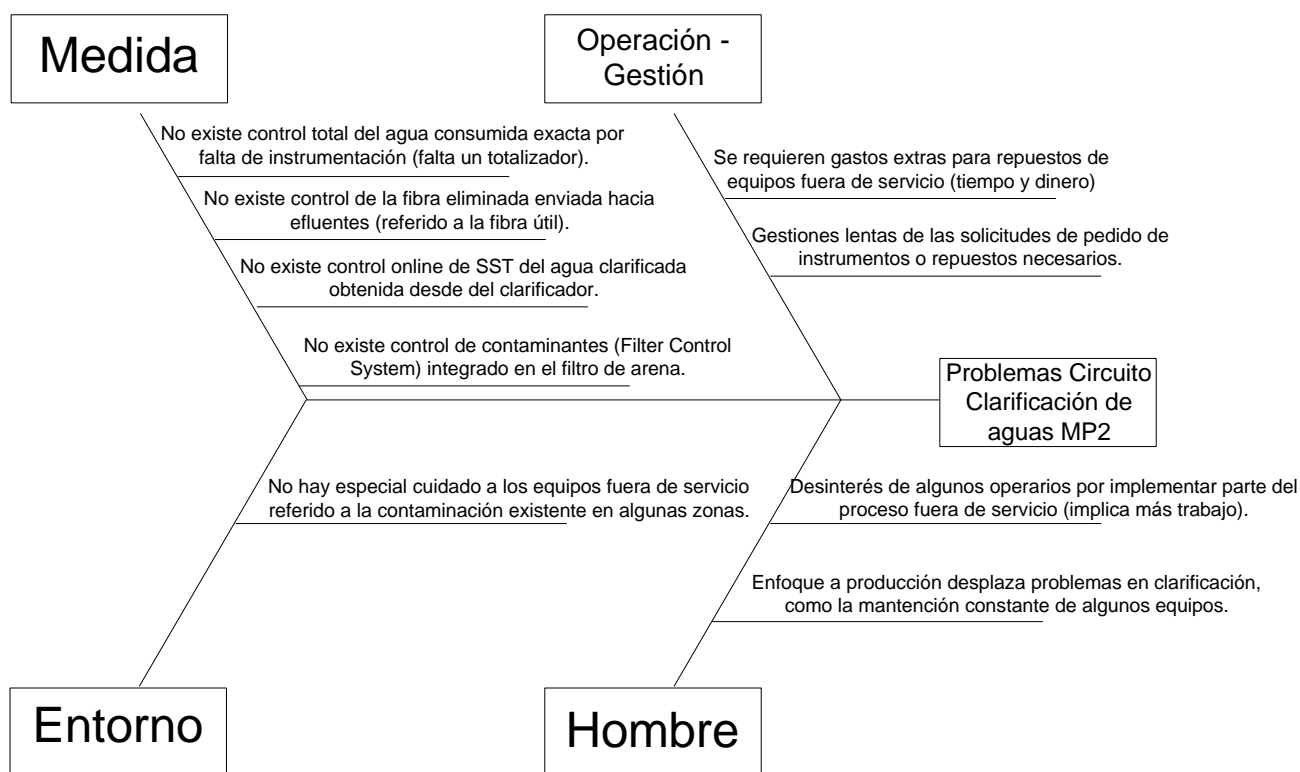


Figura 30: Diagrama de Ishikawa de las causas de los problemas en la clarificación de aguas en la MP2.

A grandes rasgos, existe poca preocupación por manejar el proceso de acuerdo a la toma de datos, por lo tanto, los operarios no saben los consumos de agua y cantidad de fibras no recuperadas al no disponer de estos equipos. Asimismo, existe una tendencia al

desinterés de mantener funcionando estos equipos en caso de que operen nuevamente, pues implica un esfuerzo y trabajo extra paralelo a la producción de papel que deben controlar turno a turno. Con lo anterior, cabe destacar que el problema de origen se asocia a una falla operacional más que un defecto en el diseño de los equipos. Este problema existe desde el año 2011, debido a un bloqueo eléctrico de uno de los equipos en cuestión, generando una serie de eventos que desemboca en un sobreconsumo de agua industrial.

4.2.1 Estado actual de equipos fuera de servicio

Los equipos fuera de servicio del circuito de clarificación de aguas y su estado actual se detalla a continuación, utilizando los TAGS propios de la máquina:

- Fraccionador de Fibras (en adelante FF-324): Equipo se encuentra en servicio y está parcialmente bypassado, es decir, el motor de giro de la canasta de criba funciona pero no cumple con su objetivo de operación. Este bypass se dirige completamente al tanque TQ-326.



Figura 31: Fraccionador de fibras FF-324. La fracción de fibras gruesas va al TQ-325, el agua con finos al TQ-326.

- Bomba BB-325: No cuenta con problemas técnicos y no necesita repuestos, solo posee el bloqueo en el tablero eléctrico de control cuyo acceso está cerrado por un candado. Para quitar el candado, se debe realizar un reporte de incidentes para romper el candado y realizar las pruebas de funcionamiento eléctrico, hecho que se realizó en noviembre de 2018.



Figura 32: Bomba BB-325. Alimenta al espesador EE-324.

- **Espesador (en adelante EE-324):** Equipo que se encuentra fuera de servicio desde el 2011 debido al bloqueo eléctrico de la bomba BB-325. Este equipo está descuidado y contaminado (oxidado) debido a que el espesador de recortes (FT-350) que se ubica al lado le falta su tapa, humedeciendo la zona de trabajo. Le faltan algunas piezas y repuestos, además de limpieza, cuidado, lubricación y chequeos de funcionamiento, dado que ha estado paralizado por mucho tiempo.



Figura 33: Espesador EE-324, el flujo de fibra gruesa ingresa al TQ-350 (Recortes), mientras que el agua con finos se dirige al TQ-326.

- **Bomba BB-335:** No cuenta con problemas técnicos y no necesita repuestos, basta con encenderla desde el panel de control.



Figura 34: Bomba BB-335. Alimenta los filtros de arena con agua clarificada.

- Filtros de arena (en adelante FA-335): Este equipo presenta problemas debido a que existe compactación de la arena en el cono del equipo, provocado por la acumulación de partículas grandes presentes en el agua de alimentación. Como medida se ha implementado una cañería de alimentación en la base inferior del equipo, con el objetivo de fluidizar el lecho inferior y evitar la compactación, sin resultados aparentes (teniendo los demás equipos fuera de servicio). Para evitar problemas paralelos, se caracterizó la arena y el diseño del equipo, considerando que el tamaño, esfericidad y composición de la arena es el correcto y que el tiempo de residencia del agua en el lecho es el adecuado.

En el circuito existen 2 filtros, uno denominado A y el otro B. El filtro tiene el sistema de inyección de aire a una celda de lavado completo, el otro le faltan instrumentos de medición. Se ha probado su funcionamiento en ocasiones anteriores, pero no se han tenido los resultados esperados, debido a que la concentración de fibras en la alimentación es muy grande. Se han realizado lavados en el equipo, observando la gran cantidad de fibra acumulada en la arena en la Figura 36.



Figura 35: Filtros de arena (FA-335A y B) del circuito de clarificación de aguas de la MP2.



Figura 36: Fibras largas en el agua superclarificada, dirigida hacia el tanque TQ-336 (situación con equipos fuera de servicio).

No se mencionan detalles acerca del clarificador pues no presenta problemas de operación actualmente.

Resumiendo, el espesador ha estado fuera de servicio por más de 7 años, por lo que es necesario implementar una metodología que priorice la revisión de sus componentes, así como su eficiencia. En este caso, será necesario realizar pruebas que determinen y cataloguen su funcionamiento como deficiente, normal o eficiente, para gestionar los

repuestos necesarios o bien, modificar completamente el equipo con la compra de uno nuevo.

4.2.2 Diagnóstico de operación

Utilizando la información de las etapas de clarificación de aguas entregada por la Sección 2.7 Clarificación de aguas del proceso, se presentan a continuación 2 diagramas del circuito de la clarificación de aguas, una en su condición idónea y la otra en su condición actual:

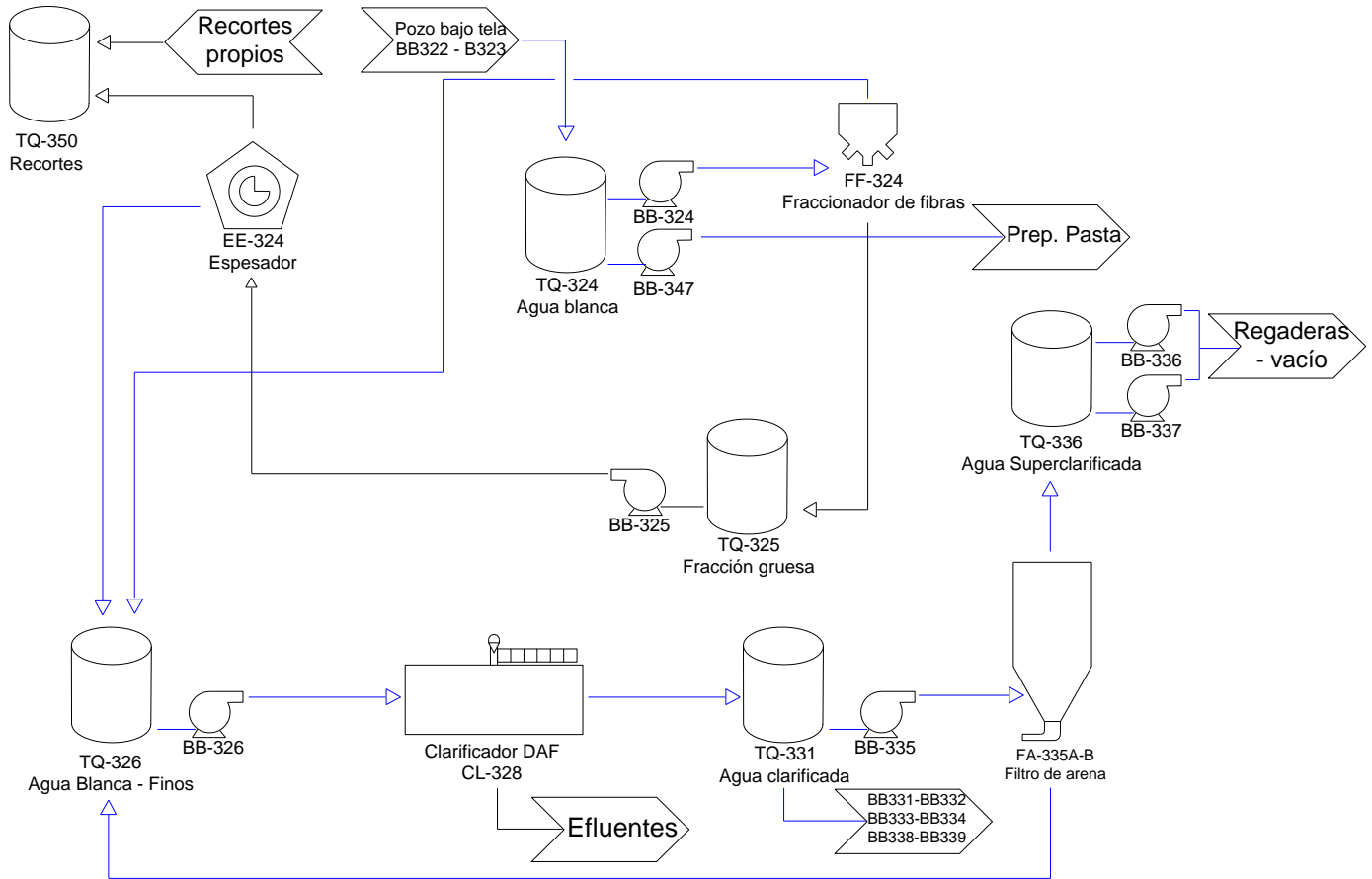


Figura 37: Circuito de clarificación de aguas de la MP2 en su condición idónea. La línea negra representa flujo de fibras, mientras que la línea azul es agua.

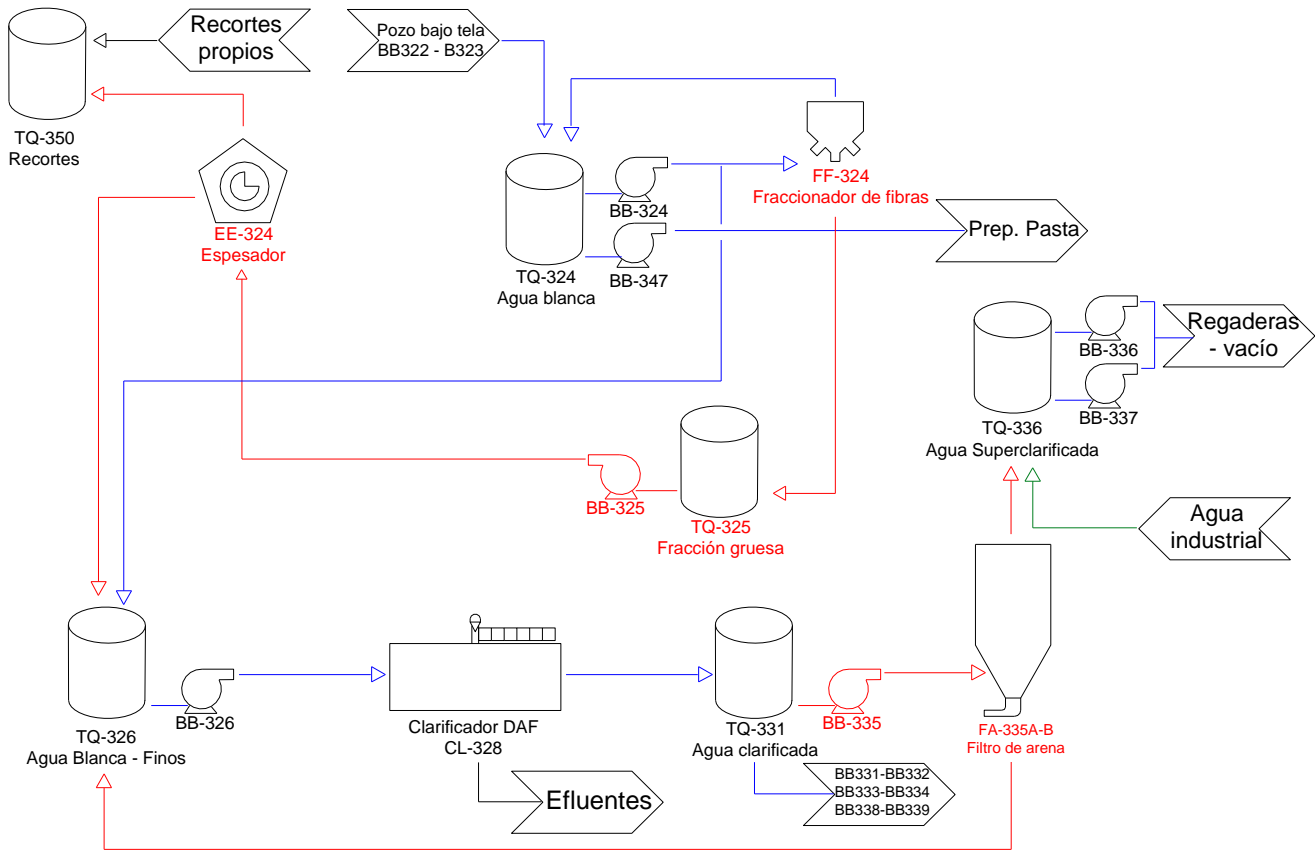


Figura 38: Circuito de clarificación de aguas de la MP2 en la actualidad. El color rojo representa las líneas y equipos fuera de servicio.

Dada la falla del sistema de clarificación presentada y que el proceso necesita de agua superclarificada para el uso de regaderas de alta presión, se utiliza una gran cantidad de agua industrial para llenar el tanque TQ-336 y compensar lo faltante. Además, existe la problemática de que a futuro se instalará otra bomba centrífuga a la salida del tanque TQ-336 para la instalación de nuevas regaderas de alta presión en la máquina, por lo que el consumo de agua industrial se vería aumentado si el problema de clarificación de aguas no se soluciona. Por otro lado, se observa en la Figura 38 que no existe flujo de fibras recuperado, por lo que los sólidos son expulsados a través del clarificador en forma de lodos.

La principal causa del no funcionamiento de los equipos fuera de servicio es debido al bloqueo eléctrico de la bomba BB-325, ocasionado el año 2011. Al no disponer de los servicios estipulados, se desencadena la siguiente serie de eventos:

- Si la bomba BB-325 no funciona, no entrega alimentación al espesador EE-324, por lo que debe ponerse fuera de servicio.
- Si la bomba BB-325 no funciona, el fraccionador de fibras FF-324 no puede entregar las fibras recolectadas al tanque TQ-325. Es por eso que el fraccionador

de fibras es bypassado parcialmente y puesto fuera de servicio, y el tanque TQ-325 no es utilizado, por lo que su contenido rebalsa a canaleta.

- Si el espesador EE-324 no funciona, no puede regresar fibra útil al inicio del proceso a través del tanque TQ-350.
- Si el fraccionador de fibras FF-324 es bypassado, el flujo de agua blanca que se dirige al tanque TQ-326 contiene fibra larga y corta. Con ello, el clarificador DAF no logra eliminar todos los sólidos presentes debido a las condiciones de operación y diseño que posee, pues la fibra larga decanta y pasa al flujo de agua clarificada, dirigiéndose al tanque receptor TQ-331.
- El tanque TQ-331 posee fibras largas, cuya concentración alcanza el límite de la carga máxima aceptada por los filtros de arena, por lo tanto, estos equipos no podrían cumplir sus funciones con regularidad, descartando su funcionamiento en conjunto con la bomba BB-335, la cual alimenta ambos filtros.
- Por último, debido a que los filtros de arena no funcionan, no existe agua superclarificada que ingrese al tanque TQ-336. En consecuencia, dado que se necesita agua para las regaderas ubicadas dentro de la máquina de alta y baja presión, se debe utilizar una cantidad de agua industrial cercana a los 240 [L/min].

4.2.3 Estudio de pérdidas en clarificación de aguas

Dado que el circuito de clarificación de aguas tiene como objetivo purificar agua del proceso y recuperar las fibras del proceso antes de ser dispuestas como residuo, es necesario evaluar el impacto de pérdidas actual tanto en agua industrial como en fibras, de manera aproximada. De esta manera, se propone estimar los flujos de agua y de fibra eliminada, a través de toma de muestras y balances de masa.

Para ello, se investigaron los flujos de fluido de algunos de los equipos en funcionamiento (ver Figura 38), con fabricación de papel Crescent Former y Atmos, tales como:

- BB-324: Bomba que alimenta el fraccionador de fibras (que actualmente se encuentra bypassado) y que envía su flujo al TQ-326.
- BB-335: Bomba que alimenta los filtros de arena con agua clarificada proveniente del clarificador DAF.
- Rebalse TQ325: Dado que el fraccionador de fibras se encuentra parcialmente desviado, existe una fracción del flujo de alimentación que se dirige al tanque TQ-325, el cual rebalsa a canaleta.

De esta forma, al tener información de los flujos de agua levantados por las bombas mencionadas previamente, se puede estimar la pérdida de fibra útil que se elimina a través de la generación de lodos del clarificador y del agua clarificada, principalmente por lo medido en la bomba BB-324 y lo rebalsado por el tanque TQ-325.

Para medir consistencia se realizaron pruebas en control de calidad en preparación pasta, mientras que la fibra útil fue medida en un equipo que se encuentra exclusivamente

en la planta de Puente Alto. El estudio de pérdidas de fibra se concentra en las siguientes tablas:

Tabla 7: Flujos de fibra en el proceso de clarificación de aguas en fabricación de papel Crescent Former.

Fecha medición	Equipo estudiado	Flujo en [L/min]	Consistencia [gr/100 ml]	Flujo másico total [ton/día]	Fibra útil [%]	Flujo másico fibra útil [ton/día]
3/12/2018	TQ324 – BB324	3300	0,08	3,8	52%	1,98
	TQ331 – BB335	600	0,01	0,09	48%	0,04
	Rebalse TQ325	910	0,08	1,05	60%	0,63

Tabla 8: Flujos de fibra en el proceso de clarificación de aguas en fabricación de papel Atmos.

Fecha medición	Equipo estudiado	Flujo en [L/min]	Consistencia [gr/100 ml]	Flujo másico total [ton/día]	Fibra útil [%]	Flujo másico fibra útil [ton/día]
6/12/2018	TQ324 – BB324	3300	0,06	2,85	60,1%	1,71
	TQ331 – BB335	600	0,01	0,09	41%	0,04
	Rebalse TQ325	910	0,04	0,52	60%	0,31

En vista de lo anterior, la pérdida de fibra se asocia al flujo levantado por la bomba BB-324, ya que actualmente se dirige al TQ326, eliminándose a través de los lodos recopilados por el clarificador. Asimismo, se detecta la presencia de fibra útil en el agua clarificada, en un grado mayor al 40% de los sólidos remanentes en el agua. De esta manera, este flujo de pérdidas de fibra puede ser reducido si se implementa la recuperación de las fibras, aunque no se sabe con exactitud la cantidad recuperada. El vínculo con el consumo de agua reside en una mejor calidad de agua clarificada obtenida desde la clarificación DAF y que es entregada al filtro de arena, con el objetivo de que no falle debido a la presencia de contaminantes y fibras largas de celulosa.

Es por esto, que se define un plan de acción que contempla operar nuevamente los equipos, para determinar eficiencias de operación del espesador (EE-324), fraccionador de fibras (FF-324) y filtros de arena (FA-335A y FA-335B), para tener en consideración un mejoramiento o modificación en un equipo o bien, reemplazarlo por uno nuevo. La implementación de estos equipos permitirá obtener agua clarificada con mejor calidad, donde la concentración de sólidos final será determinante para modificar la operación o el diseño del filtro de arena.

4.3 Metodologías para plan de acción en clarificación de aguas

Se define un plan de acción para evaluar el estado del sistema actual y puesta en marcha de los equipos fuera de servicio y bypassados, para tener una noción del flujo de agua y de fibras que se ahorraría al tener el circuito de clarificación funcionando

completamente. En esta ocasión, se dará énfasis al funcionamiento de la recuperación de fibras, analizando exclusivamente la operación del fraccionador de fibras FF-324 y el espesador EE-324, debido a que por tiempo no se alcanza a analizar el funcionamiento del filtro de arena. Los resultados del estudio entregarán indicios y proyecciones con respecto al funcionamiento del filtro de arena, debido a que se recuperaría la fibra larga y evitaría problemas en el lecho del filtro.

4.3.1 Operación de equipos fuera de servicio

Esta metodología consiste principalmente en reactivar la fracción del circuito que contiene los 3 equipos fuera de servicio, realizando las gestiones necesarias para operarlos nuevamente. Los equipos tales como el fraccionador de fibras (FF-324) y el filtro de arena (FA-335) han sido puestos en servicio en el año 2018, por lo que no necesitan de una mantención exhaustiva. Sin embargo, dado el tiempo fuera de servicio del espesador (EE-324), es necesario seguir una serie de pasos para evaluar de manera técnica y operacional este equipo, para corroborar su funcionamiento tanto eléctrico como mecánico:

- Chequeos estáticos del equipo: Revisión de piezas y artículos necesarios para el funcionamiento del equipo, como manómetros en buen estado, estado de las mallas filtrantes, válvulas reguladoras, mangueras de aire de instrumentación, motor de accionamiento, entre otros.
- Chequeos dinámicos del equipo: Revisión del funcionamiento de los motores del equipo, además de la funcionalidad de las piezas mencionadas anteriormente.
- Limpieza del equipo: Relacionado al aseo del equipo, limpieza de las mallas, retiro de depósitos de pasta y basura, destape de toberas y regaderas, entre otros.
- Solicitudes varias: Estas solicitudes pueden abarcar petición y compra de repuestos específicos, lubricación, revisión eléctrica, entre otros, que sean necesarias antes de realizar las pruebas de forma adecuada.
- Pruebas en vacío: Teniendo los chequeos aprobados, se procede a operar el equipo sin fluido, para determinar si falta lubricación en el reductor de giro o en las toberas de las regaderas, entre otros.
- Pruebas con fluido: Finalmente el fluido ingresa al equipo y se corrobora el buen funcionamiento del conjunto de partes del equipo.

4.3.2 Estudio de eficiencias

La eficiencia de separación se refiere al grado de separación sólido fluido de un equipo, de acuerdo a balances de masa utilizando los flujos volumétricos y másicos, consistencia y fibra útil en la entrada y salida de un equipo. De esta manera se puede tener la idea del funcionamiento del equipo, sobre todo para aquellos que han estado fuera de servicio y no se han mantenido de manera adecuada.

Actualmente el espesador (EE-324) se encuentra fuera de servicio, mientras que el fraccionador de fibras (FF-324) se encuentra operando bypassado. Es por esto que es necesario realizar un estudio operacional de las eficiencias de ambos equipos, para

corroborar la separación sólido fluido de cada equipo y obtener el flujo de fibras recuperadas, además del flujo de agua industrial ahorrada de manera indirecta. Para ello, se propone la siguiente metodología:

- Investigación de la condición base de cada equipo: Referido a los flujos idóneos de diseño del proceso y la eficiencia teórica en base a lo estipulado por el proceso original y por el diseño de los equipos.
- Medición de eficiencia del fraccionador de fibras y del espesador en el estado ideal.
- Medición de eficiencia de los 2 equipos operando de manera simultánea, y compararla con la teórica calculada previamente.

Dependiendo de los resultados de esta metodología, se puede determinar la factibilidad de operar el filtro de arena, pues la eficiencia de la recuperación de fibras largas permitiría resolver el problema de la compactación de la arena en el lecho del filtro, tarea que queda delegada a la empresa.

4.4 Metodología para el estudio de reciclaje de agua de efluentes

4.4.1 Evaluación técnica para uso del agua de efluentes en línea de agua fresca

La planta de efluentes se concentra en entregar un flujo de agua limpia hacia el río Maipo, regido por las normas estipuladas por el Decreto Supremo N°90 [27]. Los parámetros controlados por la planta son: Temperatura, pH, Sólidos Suspendidos Totales (SST), Demanda Química de Oxígeno (DQO), grado de turbidez y concentración de oxígeno disuelto.

De acuerdo a estas propiedades controladas, existe la opción de poder utilizar una fracción del agua de efluentes para integrarla a la red principal de agua industrial, logrando reducir el consumo total del agua industrial destinado a la MP2 y MP3 de manera simultánea. Sin embargo, existen 2 problemas actuales: La presencia de microorganismos y microplásticos.

- Los microorganismos y los nutrientes necesarios para desarrollarse, originarios desde los lodos residuales y del reactor biológico, logran sobrepasar a través de la etapa de clarificación secundaria. Los principales problemas se asocian al taponamiento debido a los microorganismos filamentosos y a la corrosión de cañerías y equipos por bacterias sulfato-reductoras.
- Los microplásticos presentes en el agua provoca problemas en el taponamiento y mal funcionamiento de algunos equipos, además de presentar problemas en el proceso al tener un efecto directo sobre la producción de papel, a través de la presencia de orificios en el papel al taparse las telas de la máquina por plásticos ajenos al proceso. Como dato extra, la empresa ha adquirido un filtro para microplásticos con limpieza automática para resolver este problema.

Ambos aspectos persisten en el caudal de descarga hacia el río y en el agua devuelta a la MP2, cuya conexión actual se dirige hacia la torre de enfriamiento (Ver Sección 2.5.2.1 Desgote mecánico), donde el rebalse de agua se acumula en el suelo a la exposición del

sol, presentando floración de algas. Asimismo, esta torre presenta problemas de suciedad en sus placas debido a la acumulación de plásticos y algas, la cual necesita de mantenimiento periódico.



Figura 39: Presencia de algas en el rebalse de la torre de enfriamiento de la MP2, el cual utiliza agua de efluentes de manera directa en la configuración Atmos.

Para asegurar la existencia de estos microorganismos, caracterizados por ser microalgas, bacterias de carácter sulfato-reductoras y microorganismos filamentosos (descritos en la Sección 2.8 Microbiología en el agua clarificada), es necesario identificarlos a través de estudios de laboratorio, en conjunto con las concentraciones de fosfatos y nitratos presentes en el agua, nutrientes determinantes de la presencia de algunos microorganismos.

Dependiendo de los resultados de estos estudios, se puede analizar la factibilidad de agregar un agente biocida que permita eliminar la mayoría de los microorganismos presentes en el agua de efluentes, para ser mezclada en el tanque de agua industrial que alimenta a la MP2 y la MP3. Además, de elementos necesarios para tener un control total de los microplásticos, para evitar fallas en los equipos que utilicen la mezcla del agua industrial con el agua clarificada.

4.4.2 Aspectos a evaluar en el agua de efluentes

Definidos los problemas anteriores, los estudios globales debiesen contener al menos las siguientes tareas:

- Estudio de posibles microorganismos presentes en el agua de efluentes: Analizar presencia de bacterias filamentosas, bacterias sulfato-reductoras, coliformes fecales y totales y microalgas de acuerdo a pH, temperatura del agua, nutrientes en el ambiente, etc.
- Cotizar biocida para agregarse en el tanque de agua receptora desde efluentes (TQ-381), en caso de tener presencia alta de microorganismos.

- Cotizar agitación y control automático de nivel del TQ381 con la bomba alimentadora de la torre de enfriamiento (BB-381).
- Estudio microbiológico del agua industrial enviado a las máquinas papeleras, pues no se realiza un tratamiento previo que permita eliminar posibles microorganismos presentes en las napas subterráneas. Así, se puede validar la existencia de microorganismos que se desarrollan a medida que el agua industrial avanza en el proceso y es notoria en conjunto con el ingreso de nutrientes específicos al momento de pasar por el reactor biológico en efluentes.
- Diseño de sistema de control automático de dosificación de biocida en caso de implementarse.
- Ubicación del filtro de microplásticos de manera estratégica, para utilizar al máximo el agua clarificada libre de microplásticos.
- Diseño de piping de conexión desde el tanque de agua de efluentes hacia la red principal de agua industrial que alimenta a la MP2 y MP3 (desde el tanque TQ-381 hacia el tanque TQ-502, el cual reparte el agua hacia las máquinas papeleras).

Con los requerimientos anteriores, se tiene una idea general de acción para implementar el uso de agua de efluentes hacia la red principal de agua industrial, siempre y cuando los estudios microbiológicos entreguen valores que permitan ser reducidos por un agente biocida, dependiendo de la validación de los datos según los estudios realizados.

5 Resultados y discusiones

5.1 Problemas de consumo puntuales y mejoras operacionales en MP2

Antes de mencionar los resultados de las metodologías mencionadas en la Sección 4 Estudio de alternativas para la reducción del consumo de agua, es importante mencionar algunos hechos puntuales que permitieron reducir el consumo de agua de forma instantánea, en el sentido de que no se realizaron grandes análisis para intervenir los problemas encontrados. De esta forma, se encontraron algunos problemas y soluciones:

5.1.1 Control del agua en Calandra

La calandra es un equipo utilizado en la máquina papelera que utiliza vapor para cumplir su función en el raspador, y además utiliza un sistema de intercambio de calor con agua industrial para su funcionamiento. Según la Tabla 35, este equipo se encuentra fuera de servicio, y según la Tabla 37, existe un consumo de agua asociado en forma de sistema hidráulico. Al observar en terreno se percató de que la conexión de agua industrial se encuentra abierta a pesar de que el equipo está fuera de servicio.

Para ello básicamente se cerró la válvula de agua industrial asociada, cuyo flujo ahorrado de agua estimado es de 37,2 [L/min].

5.1.2 Control del agua en Despiche de Silo TQ-314

El silo TQ-314 es un tanque perteneciente al circuito de aproximación, donde se almacena la suspensión papelera lista para ser ingresada a la máquina papelera a través de la caja de entrada. Este tanque posee 2 ingresos de agua industrial, una en forma de regaderas para bajar la espuma de la pasta en la parte superior del silo, y en el despiche, utilizado para destapar la salida del equipo.

Según la Tabla 35, el despiche no se utiliza permanentemente, y según la Tabla 37, existe un consumo de agua asociado en forma de Entrada – Make up al proceso. Al observar en terreno se percató de que la conexión de agua industrial se encuentra abierta a pesar de que no se esté realizando el despiche a tanque.

Para ello básicamente se cerró la válvula de agua industrial asociada, cuyo flujo ahorrado de agua estimado es de 95,5 [L/min].

5.1.3 Gestión de válvula reguladora

Si bien existe un problema en el área de clarificación de aguas debido a los equipos fuera de servicio, hay otra falla conectada a la válvula reguladora de agua industrial que ingresa al tanque TQ-336, ya que se encontraba abierta a pesar de que en el panel de control indicara lo contrario. Debido a que los filtros de arena se encuentran fuera de servicio, el tanque TQ-336 debe utilizar agua industrial de manera periódica no continua a través de una válvula reguladora.

Al mantener la válvula abierta de manera continua, el flujo de agua que ingresa al tanque fluctúa entre 450 [L/min] a 690 [L/min], con un promedio de 552 [L/min] para configuración Atmos y 450 [L/min] para Crescent Former, valor mayor que el utilizado por las bombas

asociadas al tanque TQ-336, donde el agua rebalsa al tanque de agua clarificada TQ-331. Al reemplazar la válvula 2 meses después de dar aviso y resolver el problema, el flujo de agua se regulariza de acuerdo a las necesidades del tanque TQ-336. Cabe destacar que el flujo de agua industrial puede ser reducido a su totalidad si el circuito de clarificación de agua funciona de manera completa. Finalmente, se adjunta una tabla resumen con los resultados previamente mencionados:

Tabla 9: Flujos de agua industrial antes y después del arreglo de la válvula reguladora del tanque TQ-336.

Crescent Former		Atmos	
Situación	Flujo de agua a TQ-336 [L/min]	Situación	Flujo de agua a TQ-336 [L/min]
Válvula reguladora en mal estado	450	Válvula reguladora en mal estado	552,5
Válvula reguladora arreglada	239,45	Válvula reguladora arreglada	224,2
Ahorro de agua	210,55	Ahorro de agua	328,3

5.1.4 Sello mecánico en BB-314

La bomba BB-314 se caracteriza por ser la bomba Fan Pump, impulsora de pasta hacia la caja de entrada en la máquina papelera (perteneciente al circuito de aproximación). Esta bomba utiliza un sello mecánico para enfriar la superficie de la bomba, con un flujo de agua cercano a los 50 [L/min]. Esta bomba posee el empaquetamiento interno que poseen otras bombas centrífugas para estabilizar su temperatura, pero necesita un cambio en la configuración mecánica para sacar el anillo interno donde circula el agua industrial (cambio en los manguitos) para mantener una temperatura idónea de operación.

Para ello, hay que solicitar el cambio en los manguitos de la bomba para extraer el sistema con el sello mecánico y dejar de manera independiente el sistema de empaquetamiento interno. Solicitar el cambio y la eliminación del anillo interno permitirá cerrar las válvulas de agua que ingresa al sistema de la bomba, ahorrando un flujo de 49,6 [L/min] de agua industrial. Este cambio de configuración se realizará entre marzo y abril del año 2019, por lo que la reducción de consumo no es efectiva al momento del estudio, pero se considerará en el cálculo final.

5.1.5 Control de flujos de agua en pantalla de DCS

Bajo el contexto de la reducción del uso de agua en la máquina papelera, es necesario tener una vista general del sistema de distribución en la planta para controlar de manera completa el consumo de agua no solo en la MP2, sino que también en las otras máquinas paperas. Para ello se generaron 4 diagramas del uso de agua industrial, uno para cada máquina y uno a modo general. En estos diagramas se puede observar a nivel global y

particular cuando se encuentren consumos excesivos a raíz de emergencias o consumos anormales. Este diagrama debe ser implementado en el Sistema de Control Distribuido (DCS), donde los operarios pueden observar y manejar su máquina respectivamente, o alertar a otra en caso de ser necesario.

Este diagrama tiene contemplado el uso de flujómetros en todas las conexiones distribuidas desde la red principal, contemplando la compra de 8 flujómetros (Agua potable, agua para caldera, agua para conversión, control en MP2, control en PPA3, control en PPA1, control en efluentes y control en sistema de vacío de la MP1) y su correspondiente cableado eléctrico e instalación. Este diagrama no contempla el uso otorgado por la red de incendios.

Los diagramas consisten en la imagen con la vista general de la planta, y 3 imágenes que muestran la red de agua industrial de cada una de las 3 máquinas papeleras, los que se encuentran en el Anexo E: Pantallas de control de agua industrial en máquina.

5.1.6 Impactos de ahorro de agua en consumos puntuales

Los impactos mencionados en esta sección, los cuales no involucran un cambio operacional en el proceso de la MP2, se cuantifican y resumen a continuación:

Tabla 10: Impactos de consumo reducidos para los problemas eventuales encontrados en la máquina para Crescent Former.

Modificación	Flujo ahorrado [L/min]	Flujo ahorrado [m³/día]
Cierre de válvula de Calandra	37,2	53,57
Cierre de válvula a Despiche deTQ-314A	95,5	137,52
Gestión de válvula reguladora de agua industrial en tanque TQ-336	210,55	363,3
Eliminación sello mecánico de FAN Pump (BB314)	49,6	71,42
Flujo de agua total ahorrado	392,85	565,7

Tabla 11: Impactos de consumo reducidos para los problemas eventuales encontrados en la máquina para Atmos.

Modificación	Flujo ahorrado [L/min]	Flujo ahorrado [m³/día]
Cierre de válvula de Calandra	37,2	53,57
Cierre de válvula a Despiche deTQ-314A	95,5	137,52
Gestión de válvula reguladora de agua industrial en tanque TQ-336	328,3	472,75
Eliminación sello mecánico de FAN Pump (BB314)	49,6	71,42
Flujo de agua total ahorrado	510,6	735,26

Con la información previa, los consumos finales de agua utilizados en la MP2 son:

Tabla 12: Consumo final de la MP2 posterior a las modificaciones puntuales para la configuración Crescent Former. Se utiliza el dato de producción diaria promedio.

Flujo total	Flujo [L/min]	Flujo [m³/día]	Producción promedio [ton/día]	Consumo específico [m³/ton]
Antes de las modificaciones	909,93	1310,3	73,87	17,74
Después de las modificaciones	517,08	744,59	73,87	10,08
Medición final en terreno	551	793,44	73,87	10,74

Tabla 13: Consumo final de la MP2 posterior a las modificaciones puntuales para la configuración Atmos. Se utiliza el dato de producción diaria promedio.

Flujo total	Flujo [L/min]	Flujo [m³/día]	Producción promedio [ton/día]	Consumo específico [m³/ton]
Antes de las modificaciones	1019,83	1468,56	34,18	42,96
Después de las modificaciones	509,83	734,15	34,18	21,47
Medición final en terreno	564	812,16	34,18	23,76

En vista de lo anterior, se redujo en un 39% el consumo de agua para Crescent Former y en un 45% para Atmos. Sin embargo, estos flujos finales se encuentran subestimados, pues existen consumos eventuales en algunas conexiones tipo Entrada – Make Up al proceso, que no se registran debidamente pues se utilizan con baja frecuencia. Cabe destacar que el trabajo asociado al sello mecánico de la BB-314 se realizará en Marzo – Abril del 2019, periodo fuera del plazo de estudio.

Finalmente, es necesario comentar que se instalará una nueva bomba de alta presión asignado al tanque TQ-336, la cual tiene una capacidad de 270 [L/min]. Si el filtro de arena no se encuentra operativo, este flujo debe ser agregado al consumo total de la máquina, aumentando el consumo específico de agua en la MP2 si la producción se mantiene. De esta manera, la medición final en terreno y la instalación de esta bomba cambiará los consumos específicos de ambas configuraciones de papel:

Tabla 14: Medición final en configuración Crescent Former, incluyendo la bomba de alta presión nueva a instalar.

Flujo total	Flujo [L/min]	Flujo [m ³ /día]	Producción promedio [ton/día]	Consumo específico [m ³ /ton]
Medición final en terreno	551	793,44	73,87	10,74
Instalación de la bomba nueva	270	388,8	73,87	5,26
Medición final teórica	821	1182,24	73,87	16

Tabla 15: Medición en configuración Atmos, incluyendo la bomba de alta presión nueva a instalar.

Flujo total	Flujo [L/min]	Flujo [m ³ /día]	Producción promedio [ton/día]	Consumo específico [m ³ /ton]
Medición final en terreno	564	812,16	34,18	23,76
Instalación de la bomba nueva	270	388,8	34,18	11,38
Medición final teórica	834	1200,96	34,18	35,14

5.2 Eficiencias de equipos fuera de servicio en MP2

Utilizando la metodología para los equipos fuera de servicio del área de clarificación de aguas, se procede a estimar los flujos volumétricos y másicos de cada equipo una vez puesto en servicio el espesador EE-324. Debido a que los equipos estuvieron deshabilitados mucho tiempo, es preferible estimar la eficiencia de separación de manera empírica a través de la medición de flujos y consistencias en ambos equipos.

Los datos teóricos fueron extraídos desde los diagramas de flujo de diseño propios de las máquinas y de manuales de operación de los equipos, mientras que los datos reales fueron seleccionados a través de pruebas realizadas en el año 2017 y en el periodo de estudio de este trabajo. La eficiencia se referirá a la cantidad de masa extraída desde el flujo de alimentación de forma empírica, incluyendo la que viene en el agua de las regaderas, a través de la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{F_{fibra\ recuperada}}{F_{alimentación} + F_{regaderas}} \cdot 100\% \quad (\text{Ec. 1})$$

5.2.1 Fraccionador de fibras

La condición base para este equipo de acuerdo al diseño del proceso opera de acuerdo a la siguiente tabla de datos:

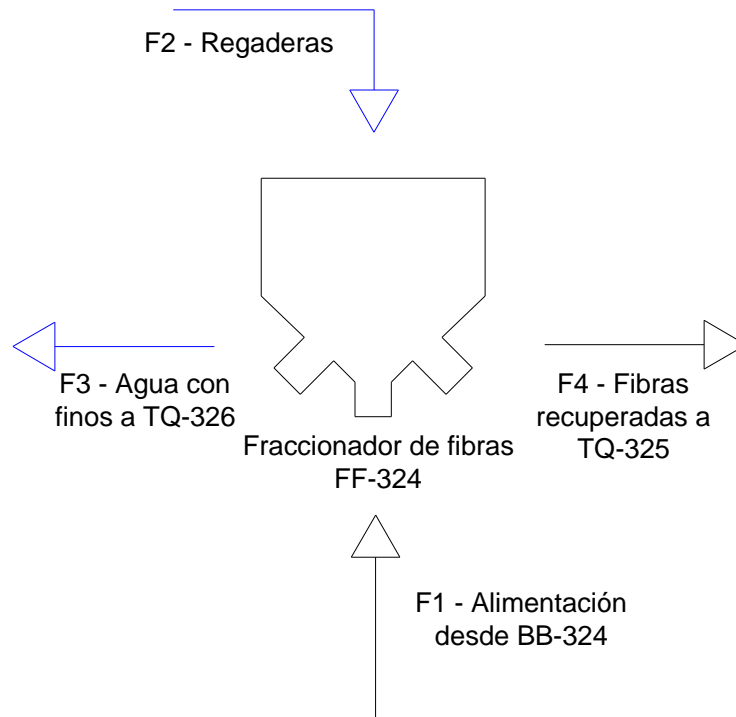


Figura 40: Flujos de entrada y salida en el fraccionador FF-324. Las líneas negras representan fibras, mientras que las azules representan agua.

Tabla 16: Valores de flujos asociados al fraccionador de fibras FF-324.

Flujo / parámetro	Nomenclatura	Valor teórico	Valor real	Dimensión
Flujo volumétrico entrada	F1	7072	3300	[L/min]
Consistencia entrada	-	0,06	0,08	[gr/100 ml.]
Flujo de fibras entrada	F1	4,24	2,64	[kg/min]
Flujo de agua de regaderas	F2	80	100	[L/min]
Consistencia regaderas	-	0,05	0,02	[gr/100 ml.]
Flujo másico de finos en regaderas	F2	0.04	0.02	[kg/min]
Flujo de agua con finos	F3	5658	1900	[L/min]
Consistencia finos salida	-	0,06	0,02	[gr/100 ml.]
Flujo másico de finos	F3	3,4	0,38	[kg/min]
Flujo de fibras concentradas	F4	1494	1500	[L/min]
Consistencia fibras salida	-	0,06	0,152	[gr/100 ml.]
Flujo másico de fibras	F4	0,9	2.27	[kg/min]
Eficiencia de separación η_{frac}	$F4/(F1+F2)$	20,9%	85,4%	%

5.2.2 Espesador

El espesador EE-324 representa un desafío para mantenerlo operativo debido a los años que estuvo detenido. Para ello se realizó una serie de eventos para volver a ponerlo en funcionamiento, consistente en revisiones, cambios de aceite en los motores de los reductores, pruebas del equipo, etc., representados en el Anexo F: Carta Gantt para programación de operación del espesador.

La condición base caracterizada por el diseño del proceso y su situación operacional sin el bypass (es decir, ingresa el flujo completo de la bomba BB-324 hacia el equipo) entrega la siguiente tabla de datos:

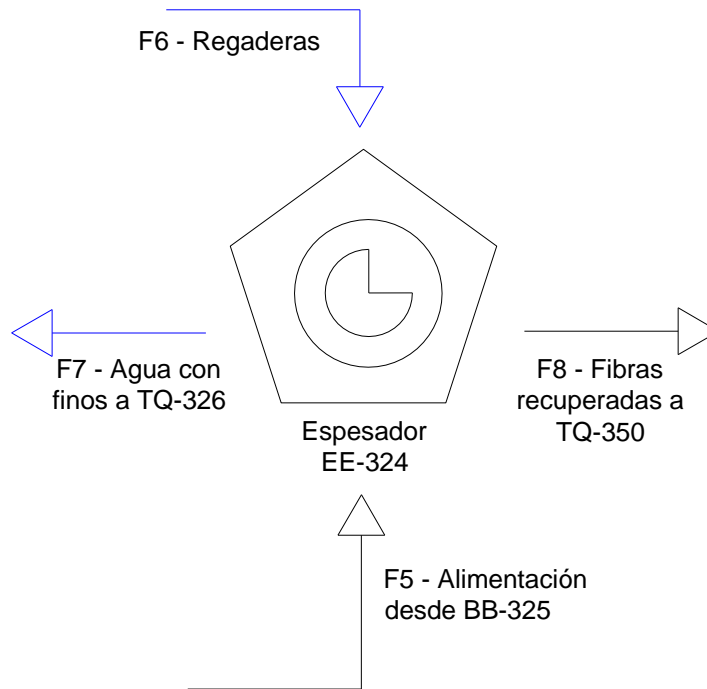


Figura 41: Flujos de entrada y salida en el espesador EE-324. Las líneas negras representan fibras, mientras que las azules representan agua.

Tabla 17: Valores de flujos asociados al espesador EE-324.

Flujo / parámetro	Nomenclatura	Valor teórico	Valor real	Dimensión
Flujo volumétrico entrada	F5	1490	1500	[L/min]
Consistencia entrada	-	0,06	0,152	[gr/100 ml.]
Flujo de fibras entrada	F5	0,9	2,27	[kg/min]
Flujo de agua de regaderas	F6	380	380	[L/min]
Consistencia regaderas	-	0,05	0,02	[gr/100 ml.]
Flujo másico de finos en regaderas	F6	0,19	0,08	[kg/min]
Flujo de agua con finos	F7	1859	1825	[L/min]
Consistencia finos salida	-	0,02	0,013	[gr/100 ml.]

Flujo másico de finos	F7	0,37	0,24	[kg/min]
Flujo de fibras concentradas	F8	18	55	[L/min]
Consistencia fibras salida	-	4	3,8	[gr/100 ml.]
Flujo másico de fibras	F8	0,72	2,09	[kg/min]
Eficiencia de separación η_{esp}	F8/(F5+F6)	66,3%	89%	%

Por último, la eficiencia operacional global de recuperación de fibras se calcula multiplicando la eficiencia del fraccionador de fibras y del espesador en conjunto:

$$\eta_{total} = \eta_{frac} \cdot \eta_{esp} = 85,4\% \cdot 89\% = 76\% \quad (\text{Ec. 2})$$

Utilizando los valores encontrados, se determina que la recuperación de fibras es de un 76% para un flujo másico inicial (F1+F2) de 2,64 [kg/min]. A escala macro, la cantidad de fibra que ingresa al sistema (F1+F2) equivalente a 3.8 [ton/día] es eliminada hacia efluentes en la actualidad, mientras que con los equipos operativos se puede recuperar hasta un flujo de 2.89 [ton/día], recirculando al proceso propio de la máquina.

5.2.3 Reducción de agua industrial en clarificación

Con los resultados preliminares, la operación completa del fraccionador de fibras y el espesador permitiría eliminar parte de la fibra larga del agua del circuito, por lo que el agua clarificada debiese contener una baja concentración de partículas grandes. Sin embargo, dada circunstancias ajenas al estudio, no se pudo estudiar más a fondo el efecto de la extracción de la fibra larga en el clarificador y el filtro de arena, actividad que queda a disposición de la empresa.

Sin embargo, es necesario programar lavados periódicos del lecho para evitar fallas inesperadas por la presencia de la fibra larga residual, utilizando un flujo de agua industrial fijo durante un periodo de tiempo determinado. Esta programación secuencial evitaría la compra de un sensor para detectar partículas contaminantes presentes en el agua clarificada de alimentación del filtro, cuyo lazo de control funcionaría de manera automática bajo el mismo principio del lavado del lecho de arena.

El flujo de agua industrial se utiliza para lavar el lecho de arena y para llenar el tanque de agua superclarificada una vez mientras se realiza un lavado, dado que el sistema requiere de agua de manera continua. Los datos mencionados se señalan en la siguiente tabla:

Tabla 18: Parámetros para el lavado del filtro de arena, entregados por el proveedor del equipo.

Parámetros para el lavado en filtro de arena	Valor de parámetros
Volumen de lavado	8 [m ³]
Periodo de lavado	6 veces al día
Duración de lavado	30 [min]
Flujo de agua industrial normalizado para lavado	48 [m ³ /día] = 33,3 [L/min]
Flujo de agua industrial normalizado para llenado de tanque	83,5 [m ³ /día] = 58 [L/min]
Flujo de agua industrial utilizado total	91,3 [L/min]

Dado que el funcionamiento del filtro de arena constituye un consumo de agua industrial para lavado y llenado del tanque, el flujo de agua ahorrado y consumo específico final de la MP2 para cada configuración de papel se encuentra a continuación:

Tabla 19: Flujos de agua utilizados en el filtro de arena y consumo final en MP2 en configuración Crescent Former, con una producción de 73,87 [ton/día].

Flujo de agua industrial	Flujo en [L/min]	Flujo en [m ³ /día]	Consumo específico ahorrado [m ³ /ton]
Uso a TQ-336 con filtro de arena fuera de servicio	239,45	344,81	4,67
Uso a TQ-336 con filtro de arena en servicio	91,3	131,47	1,78
Ahorro de agua industrial	148,15	213,34	2,89

Tabla 20: Flujos de agua utilizados en el filtro de arena y consumo final en MP2 en configuración Atmos, con una producción de 34,18 [ton/día].

Flujo de agua industrial	Flujo en [L/min]	Flujo en [m ³ /día]	Consumo específico ahorrado [m ³ /ton]
Uso a TQ-336 con filtro de arena fuera de servicio	224,2	322,85	9,45
Uso a TQ-336 con filtro de arena en servicio	91,3	131,47	3,85
Ahorro de agua industrial	132,9	191,38	5,6

Recordando la instalación de la bomba de alta presión nueva asociada al tanque TQ-336, la influencia del funcionamiento del filtro es clave para el ahorro del agua. Dado que las bombas actuales necesitan de un flujo cercano a los 220 – 240 [L/min], sumando el flujo de la bomba nueva (270 [L/min]), el tanque necesita de un flujo de agua permanente aproximado a los 490 – 510 [L/min], flujo que puede ser entregado por el filtro operando, con un valor de 520 [L/min]. Dado lo anterior, basta con la implementación de un filtro de arena se alimente con un flujo de 600 [L/min] de agua clarificada para resolver el problema del agua industrial del circuito de clarificación.

Finalmente, se obtiene el consumo final de la máquina si el filtro de arena se encuentra operativo, representado por los siguientes datos:

Tabla 21: Consumo final de la MP2 con la propuesta del filtro de arena operando, en configuración Crescent Former.

Flujo total	Flujo [L/min]	Flujo [m ³ /día]	Producción promedio [ton/día]	Consumo específico [m ³ /ton]
Medición final en terreno	551	793,44	73,87	10,74
Ahorro con filtro operando	148,15	213,34	73,87	2,89
Medición final teórica	402,85	580,1	73,87	7,85

Tabla 22: Consumo final de la MP2 con la propuesta del filtro de arena operando, en configuración Atmos.

Flujo total	Flujo [L/min]	Flujo [m ³ /día]	Producción promedio [ton/día]	Consumo específico [m ³ /ton]
Medición final en terreno	564	812,16	34,18	23,76
Ahorro con filtro operando	132,9	191,38	34,18	5,6
Medición final teórica	431,1	620,78	34,18	18,16

5.2.4 Recomendaciones para mantenimiento de operación

Para mantener operativo el circuito completo de la clarificación de aguas, es necesario tener algunas precauciones ligadas a un mantenimiento adecuado en algunos equipos o bien, adquirir algunos elementos que aporten a la minimización de fallas tanto en el fraccionador de fibras como en el filtro de arena:

- Mantenimiento del fraccionador de fibras: Se necesita una mantención periódica para un buen funcionamiento, debido a que la canasta de criba utilizada en el interior tiende a taparse debido a la presencia de diversos fragmentos plásticos, cintas adhesivas, astillas u otros. Por esto, se recomienda que en las planificaciones de tareas de la máquina se encuentre la mantención de este equipo, consistente en la revisión de las regaderas, la canasta de criba (malla) y el distribuidor de flujo, para liberarlo de sus residuos sólidos grandes. Esta mantención debiese realizarse cada 10 días (en casos extremos, 15 días), el cual permitirá evitar los problemas inesperados durante la operación de la recuperación de fibras.

Por otro lado, dentro del agua del circuito existe agua proveniente desde el agua de efluentes, debido a que el rebalse del pozo de las bombas de vacío ingresa al tanque de agua blanca, incorporándose al circuito de clarificación de aguas. Dado que se instalará el filtro de microplásticos desde la planta de efluentes (el cual ingresa a la torre de enfriamiento y a las bombas de vacío), existe un indicio de que la cantidad de plásticos se reduzca en este circuito si se soluciona un problema existente en la MP3, relacionado a un equipo que elimina plásticos grandes y que son enviados directamente a la canaleta que se dirige a la planta de efluentes. Actualmente existe un proyecto que permitiría evitar que el flujo de plásticos se dirija a esta canaleta, por lo que los equipos que se encuentran en la misma planta de efluentes y en la MP2 mejorarían su operación al evitar paradas de mantención para la limpieza de estos residuos.
- Instalación de mallas en canaletas: El tanque de recepción de aguas blancas (TQ-324) obtiene agua desde el tanque TQ-322, el cual recolecta agua desde las canaletas del piso subterráneo de la máquina papelera. A menudo, dado el aseo realizado en este piso, la basura cae a canaleta ingresando al tanque TQ-322. Este problema origina acumulación de plásticos en el fraccionador de fibras FF-324, tapando el distribuidor de flujos y deteniendo la operación del equipo. Es por esto que se recomienda la instalación de 2 mallas antes de la entrada hacia este

tanque en la canaleta, para remover los plásticos grandes de forma periódica. Para mantener funcional el fraccionador de fibras, se recomienda retirar la basura al comienzo de cada mañana, o bien, al comienzo de cada turno en caso de haber realizado algún tipo de aseo en el piso subterráneo de la máquina.

- Tapa del espesador de recortes: Al costado de la ubicación del espesador se encuentra otro tipo de espesador, denominado de recortes (utilizado para papeles rechazados en el bobinado de la máquina). Este espesador trabaja con un filtro rotatorio y actualmente le falta la tapa de cubierta. Este hecho ha desencadenado problemas de contaminación y humedad excesiva en la zona de ubicación de los cleaners del circuito de aproximación y los mismos espesadores, afectando de gran manera el motor reductor de los discos giratorios del espesador fuera de servicio. Con el objetivo de erradicar la contaminación y preservar el funcionamiento del espesador es que se recomienda la instalación de la tapa, aunque es un trabajo designado para gente externa de la planta cuya cotización se encuentra en proceso.
- Seguridad en la zona del espesador: A raíz del problema anterior, la humedad en el ambiente ha corroído gran parte de las instalaciones de los espesadores, traducido en un peligro en la seguridad del lugar dado que las barandas se encuentran oxidadas y en mal estado. Si se instala la tapa del espesador de recortes, es necesario el cambio de las barandas de la zona, para mantener la seguridad de los operarios al momento de hacer aseo o supervisión en dicha zona.
- Estudio de fluidización: En caso de que el problema de taponamiento persista en el filtro de arena, es necesario realizar un estudio práctico con respecto a la fluidización de la arena en el cono del filtro. Dado que se instaló una alimentación inferior y se corroboró la granulometría de la arena utilizada, es importante calcular la velocidad mínima de fluidización del lecho de arena con el objetivo de definir el caudal de alimentación inferior idóneo sin que la arena suba hasta el agua superclarificada. Para ello, se debe establecer la calidad del agua de alimentación, definido por la operación del espesador y clarificador en ambas configuraciones de papel, y la magnitud del flujo levantado por la bomba alimentadora al filtro.

5.3 Evaluación del agua de efluentes para integrarse a la red de agua industrial

Esta evaluación tiene como objetivo principal reciclar el agua obtenida desde la planta de efluentes e integrarla en la red principal de agua industrial, de manera de reducir el consumo de agua industrial total de la MP2 y MP3. Para ello, se debe analizar la composición microbiológica del agua y resolver el problema con los microplásticos en el agua, con el fin de mantener un control estricto para que los procesos de la MP2 y MP3 operen de manera regular. Por efectos de calidad de papel, la MP1 queda descartada de este proyecto.

5.3.1 Estudio microbiológico

El flujo de agua proveniente de la planta de efluentes posee variados compuestos disueltos, los cuales están controlados de manera interna por la planta y de manera externa por empresas contratadas. Dentro de la lista de compuestos están los fosfatos y nitratos, fundamentales para el crecimiento de microalgas y microorganismos similares en el agua, caracterizados por ser aerobios y anaerobios.

A raíz de lo anterior, se decide caracterizar los microorganismos en el agua industrial enviada a las máquinas papeleras, pues actualmente no existe un tratamiento biológico del agua. De esta manera, pueden existir microorganismos que no tienen origen en el proceso del papel, sino que en la napa subterránea, por lo que solucionar este problema indicaría una menor presencia y variedad de microorganismos en lo que respecta al agua obtenida desde la planta de efluentes.

El estudio contempla la identificación de microorganismos que tienen mayor probabilidad de aparecer en el agua clarificada y mayor efecto en el proceso de las máquinas, tales como las bacterias filamentosas, microalgas, bacterias sulfato-reductoras y coliformes fecales y totales (descritos en la Sección 2.8 Microbiología en el agua clarificada). A continuación, se destacan los efectos los microorganismos en el proceso de fabricación de papel, en caso de no ser controlado.

Tabla 23: Principales microorganismos a analizar en el agua industrial y en el agua proveniente desde la planta de efluentes.

Tipo de microorganismo	Efecto en el proceso
Bacterias sulfato-reductoras	Corrosión del hierro presente en cañerías y equipos
Bacterias filamentosas aerobias y anaerobias	Suciedad y/o taponamiento en las cañerías
Coliformes fecales y totales	Indicación de contaminación del agua y del proceso
Microalgas	Suciedad y/o taponamiento en las cañerías

Estos estudios son realizados por un laboratorio externo, cuyos resultados aún no han sido entregados, pero sabiendo la cantidad de microorganismos que pueden existir se puede tener la noción del sistema de control que debiese implementar.

5.3.2 Estudio de los microplásticos

Como se mencionó en la Sección 4.4.1 Evaluación técnica para uso del agua de efluentes en línea de agua fresca, la empresa ha adquirido un filtro de microplásticos especial que cuenta con una limpieza automática de la malla filtradora, cuya ubicación aún no se ha decidido. Los datos técnicos del filtro de se definen en la siguiente tabla:

Tabla 24: Especificaciones técnicas del filtro de microplásticos.

Parámetro	Valor y dimensión
Flujo de alimentación	200 [m ³ /h]
Flujo de agua de lavado	2,88 [m ³ /h]
Orificio de malla filtradora	40 [μm]
Concentración máxima de sólidos	25 [mg/L]
Área filtrante	4,38 [m ²]

Teniendo en consideración los flujos necesarios para operar el filtro, se realiza el balance de masa para ubicar el filtro, de modo que el agua clarificada pueda alcanzar a alimentar a las máquinas papeleras y a reemplazar un consumo de agua industrial detectado en la planta de efluentes, traducido en el uso de agua industrial para las regaderas de limpieza de tela de una prensa de lodos (ver Sección 2.5.4 Tratamiento de aguas). La configuración actual del agua clarificada de efluentes se representa en la siguiente imagen:

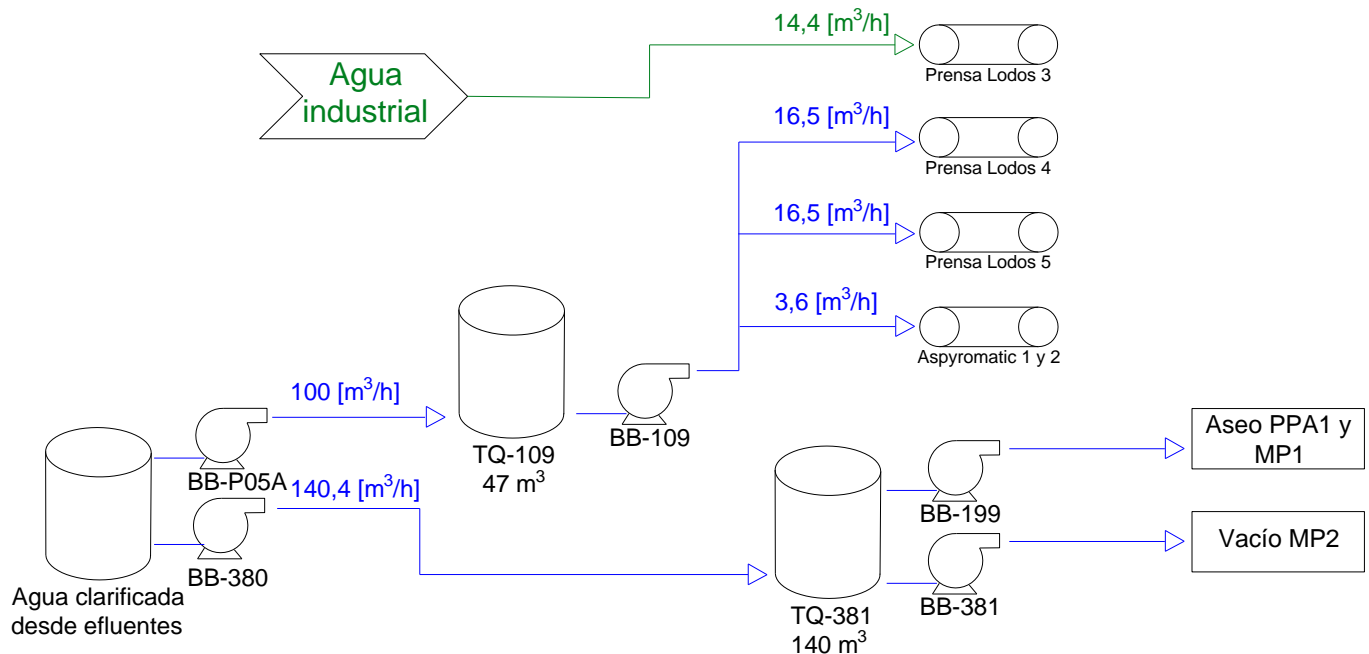


Figura 42: Uso actual del agua clarificada obtenida desde la planta de efluentes, definiendo el consumo de agua industrial en la prensa de lodos N°3.

De manera de utilizar el agua clarificada para la MP2 a través de la BB-381 y alimentar a las regaderas de limpieza de la prensa de lodos N°3, se propone la siguiente configuración para la instalación del filtro:

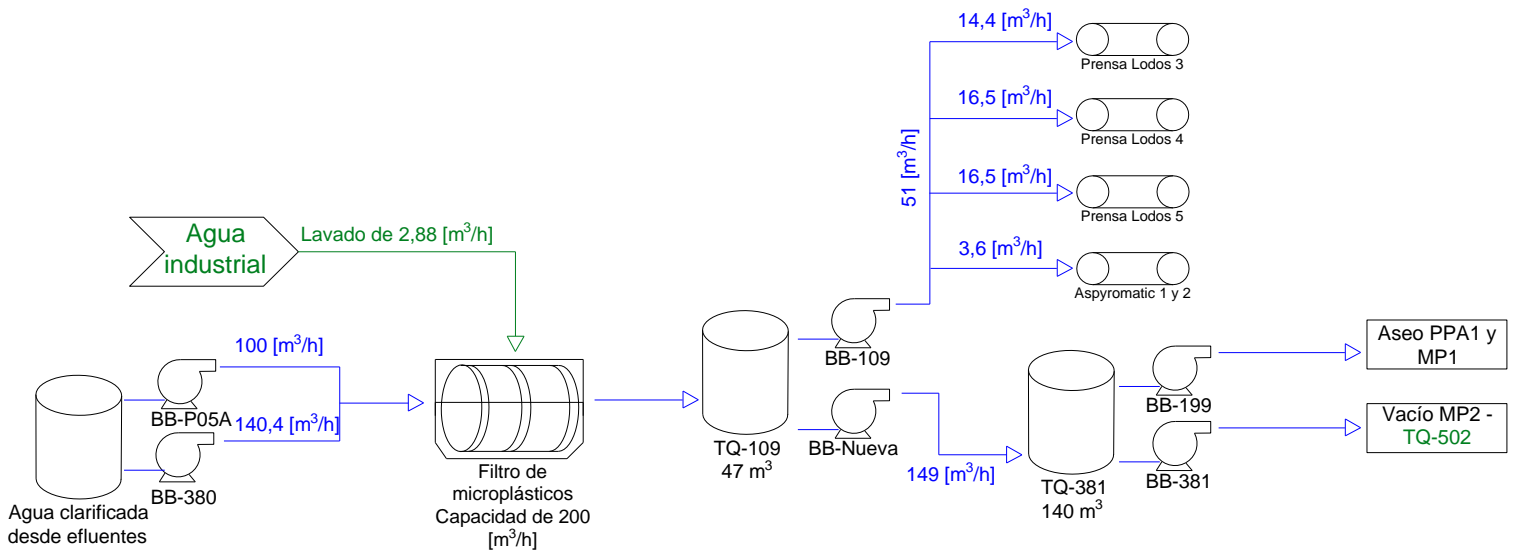


Figura 43: Diagrama de proceso propuesto para la instalación del filtro de microplásticos.

En esta configuración, el flujo de 149 [m³/h] que ingresa al tanque TQ-381 se reparte principalmente a la bomba BB-381, debido a que la bomba BB-199 se utiliza de manera periódica y con un consumo bajo (despreciable). A raíz de lo anterior, se fija que un flujo de 80 [m³/h] se dirige a la torre de enfriamiento (sistema de vacío de la MP2) y un flujo de 70 [m³/h] se dirige al tanque TQ-502. Finalmente, el diagrama para el uso del agua de efluentes dentro del agua industrial es el siguiente:

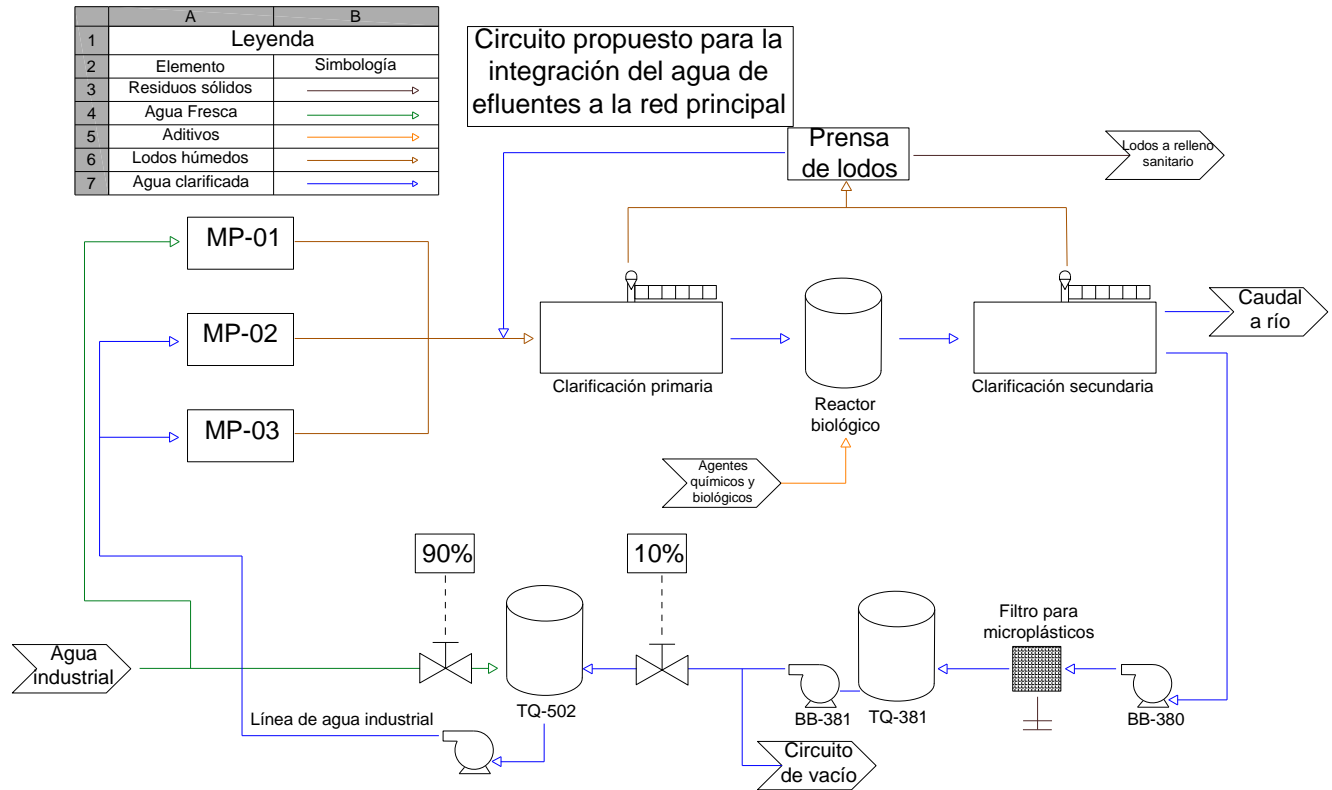


Figura 44: Diseño de la nueva red de agua industrial incluyendo al agua obtenida desde efluentes. El agente biocida se agregaría en el tanque TQ-381, y los porcentajes pueden variar.

De acuerdo a las configuraciones de proceso detalladas anteriormente, se debe considerar la adquisición de una bomba centrífuga que alimente desde el tanque TQ-109 hacia el tanque TQ-381, utilizando el piping existente entre la bomba BB-380 y el tanque TQ-381. Además, en caso de agregar el agente biocida, se necesitará de un control estricto en el tanque TQ-381, el cual consta de un agitador para el tanque, una bomba dosificadora para el agente microbiocida, y una válvula reguladora del flujo de alimentación al tanque para el lazo de control.

Los flujos utilizados para la alimentación del sistema de vacío a la MP2 son variables, pero en caso de integrarse el agua a la red de agua industrial a través del tanque TQ-502, se puede estandarizar un flujo de 80 [m³/h] al sistema de vacío de la MP2 y un flujo de 70 [m³/h] hacia el tanque TQ-502. Dado que estos flujos entregados por efluentes son fijos y las necesidades de las máquinas son variables, el flujo de agua industrial permanecerá variable para conllevar las perturbaciones propias de las máquinas.

Finalmente, dado que los resultados del estudio microbiológico aún no son entregados, no se puede estimar la dosificación del agente, por lo que el estudio queda a disposición de la empresa una vez que el proveedor tenga la información de los microorganismos que existen en el agua y que deban ser eliminados.

5.3.3 Impacto de reducción de agua industrial

La implementación del filtro de microplásticos y del control de microorganismos entregará agua de mejor calidad que puede reducir el consumo de agua industrial actual, observando efectos en la MP2, MP3 y la planta de efluentes. Si bien la reducción del uso de agua industrial en la planta de efluentes no tiene efecto en el consumo de agua específico en las máquinas, involucra un ahorro de agua a nivel global indirecto.

Para efectos de cálculo de los flujos de agua, se considerarán 2 situaciones con respecto a la MP2, dada las soluciones de la reducción de agua industrial estipuladas en este trabajo:

- Situación 1: El consumo de agua de la MP2 es reducido por la implementación completa del circuito de clarificación de aguas y resolución de todos los problemas. Por lo tanto, el flujo de agua industrial utilizado por la MP2 viene dado por la Tabla 22 (se aproxima 431,1 a 450 [L/min] por las perturbaciones en el proceso), y el flujo de la MP3 se mantiene, utilizando el dato de la Tabla 3:

Tabla 25: Flujos de agua industrial dirigidos a la MP2 y MP3 con el circuito de clarificación de aguas completo en MP2.

Flujo MP2 [L/min]	Flujo MP3 [L/min]	Flujo MP2+MP3 final [L/min]
450	2100	2550

- Situación 2: El circuito de clarificación de aguas de la MP2 sigue incompleto, por lo que el flujo de agua industrial utilizado por la MP2 y la MP3 es:

Tabla 26: Flujos de agua industrial dirigidos a la MP2 y MP3 con el circuito de clarificación de aguas incompleto en MP2.

Flujo MP2 [L/min]	Flujo MP3 [L/min]	Flujo MP2+MP3 final [L/min]
564	2100	2664

En el estudio anterior, el flujo de agua de efluentes que se dirige al tanque TQ-502 es aproximadamente 70 [m³/h], equivalente a 1166 [L/min], por lo que el consumo de agua industrial se reduciría en esta cantidad para la MP2 y MP3 en conjunto. Para saber el impacto de cada máquina, se puede realizar una relación de 3 entre los flujos de trabajo y saber el consumo de agua industrial final aproximado para cada máquina, utilizando el supuesto que la mezcla de aguas es perfecta, a través de la siguiente ecuación:

$$\frac{A. Industrial MP2}{A. Efluentes MP2} = \frac{A. Industrial MP2 + MP3}{A. Efluentes MP2 + MP3} \quad (\text{Ec. 3})$$

El resultado anterior indica que para la situación 1, un flujo de 205,76 [L/min] de agua industrial será ahorrado al utilizarse agua de efluentes en la MP2 en configuración Crescent Former. Lo mismo se realiza para la MP3, con un flujo de agua ahorrado igual

a 960,2 [L/min]. De esta forma, se puede calcular de la misma manera lo sucedido en la situación 2, cuyo ahorro en consumo específico para ambas máquinas es:

Tabla 27: Ahorro de agua industrial aproximado al implementar el uso de agua de efluentes en la red de agua industrial, considerando ambas configuraciones en la MP2.

Ahorro de agua industrial		Flujo [L/min]	Flujo [m ³ /día]	Producción promedio [ton/día]	Ahorro específico [m ³ /ton]
Situación 1	MP2 – C.F.	205,76	296,29	73,87	4,01
	MP2 – Atmos	205,76	296,29	34,18	6,02
	MP3	960,2	1382,69	134,35	10,29
Situación 2	MP2 – C.F.	246,86	355,48	73,87	3,34
	MP2 – Atmos	246,86	355,48	34,18	7,22
	MP3	919,14	1323,56	134,35	10,4

Si bien los ahorros de agua específicos para ambas máquinas son relevantes, existen ciertas variables que juegan un rol en contra a lo deseado por este nuevo uso del agua, mencionado en discusiones.

5.4 Recomendaciones extras

A pesar de que el estudio y los objetivos estuvieron relacionados completamente al proceso efectuado por la MP2 y al uso del agua de efluentes, se exponen algunas recomendaciones relacionadas a otras áreas de la planta, cuyo consumo puede ser mejorado u optimizado, tomando como referencia los consumos específicos calculados para las máquinas en el Anexo C: Consumos específicos promedio.

5.4.1 Máquina Papelera N°1 (MP1)

La MP1 posee un proceso de producción similar a las otras máquinas, salvo que esta máquina produce papel 100% celulósico, por lo que se deben mantener estándares de calidad de papel a lo largo de su fabricación. Este es un indicio de que la máquina no ha sufrido modificaciones en cuanto al proceso (en particular con el uso del agua), manteniendo la misma tecnología desde la instalación de la máquina en el año 1995. Sin embargo, existen algunos problemas y soluciones a mediano plazo que pueden ser ejecutadas para reducir el consumo específico de agua (cercano a los 45 [m³/tonelada de papel]), tales como:

- Sistema de vacío: La MP1 posee un sistema de vacío consistente en 3 bombas que trabajan en su condición óptima. Este sistema se compone solo de agua industrial, donde el agua rebalsada del pozo de vacío se dirige a canaleta. Dado que el consumo asociado a este sistema es elevado, cercano a los 650 [L/min] (936 [m³/día]), se sugiere analizar la instalación de una torre de enfriamiento, cuya operación sería similar a lo que trabaja la torre de enfriamiento de la MP2 en configuración Crescent Former, el cual solo usa agua recirculada. Dependiendo de la respuesta de un proveedor, se evaluará el mejor diseño de la torre, la cual debe aceptar un flujo de agua de alimentación entre 600 y 700 [L/min] y deberá disminuir la temperatura del agua entre 10°C a 15°C. El uso del agua

industrial en la torre es necesario para mantener un nivel constante en la piscina receptora, traducido en un buen funcionamiento en las bombas de vacío. Los datos necesarios para el diseño eficiente de la torre se encuentran en la siguiente tabla, donde se incluye la tasa de evaporación de agua aproximada, regida por la siguiente ecuación [28]:

$$Tasa\ evap.\left[\frac{m^3}{día}\right] = Flujo\ [gpm] \cdot \Delta T^{\circ}C \cdot Operación\ diaria\ [h] \cdot 0,00023 \quad (Ec. 4)$$

Tabla 28: Datos de la torre de enfriamiento idónea para el sistema de vacío en la MP1.

Parámetro	Valor y dimensión
Flujo de agua de alimentación	600 [L/min] = 158,5 [gpm]
Caída de temperatura ($\Delta T^{\circ}C$)	15°C
Tiempo operación	24 [h]

Con esto, la reposición de agua por evaporación es de 15,3 [m³/día], equivalente a 10,6 [L/min]. Si la torre de enfriamiento es considerada para la reducción de agua en la MP1, el consumo de agua industrial puede reducirse en 600 [L/min], donde los 50 [L/min] restantes se utilizarían ante eventualidades como la evaporación, posibles fugas o rebalses en la piscina receptora y corrección de la temperatura en el agua final. Utilizando datos de cotización, el valor de la torre de enfriamiento sin considerar costo de envío, trabajos de instalación, cableado eléctrico ni piping asociado es de 18130 [USD] aproximadamente, mientras que la bomba alimentadora alcanza un valor de 3000 [USD].

- Circuito de clarificación de aguas incompleto: Al igual que la MP2, la MP1 posee un problema en el sistema del agua clarificada, el cual obtiene agua superclarificada a partir de 4 filtros gravitacionales, utilizando agua clarificada como alimentación. El problema se funda en que 2 de los 4 filtros gravitacionales usados para tratar el agua clarificada se encuentran fuera de servicio, por lo que el tanque de agua superclarificada necesita de agua industrial para alimentar el sistema de las regaderas de alta presión de la máquina, abriendo y cerrando la válvula de agua industrial hacia este tanque. A continuación, se adjuntan fotografías del estado de los 2 filtros gravitacionales, los cuales dejaron de funcionar hace años:



Figura 45: Imagen del filtro gravitacional FI-01, el cual se encuentra descuidado y sin la malla filtrante.



Figura 46: Imagen del filtro gravitacional FI-02, el cual se encuentra descuidado y sin la malla filtrante.

Al igual que el cálculo del flujo normalizado en el tanque TQ-336, se utilizó la misma metodología para estimar el flujo de agua utilizado para llenar el tanque de agua superclarificada (por medio de una válvula reguladora) y considerando que existen 2 bombas asociadas que alimentan de agua industrial mezclada con agua clarificada de los 2 filtros operativos (Ver Anexo D: Cálculo de flujo de agua

normalizado). Sin embargo, este flujo no es utilizado siempre, sino que se usa aproximadamente la mitad del tiempo, de acuerdo a lo visto en las pantallas del DCS. De todos modos, el valor del flujo es cercano a los 700 [L/min], por lo que operar los filtros 01 y 02 permitiría ahorrar aproximadamente 350 [L/min].

Dado que no hubo un estudio riguroso para estos equipos, no se pudo cotizar elementos como las mallas y la mantención, lo cual queda dispuesto a la empresa, el cual se solicita un plan de acción de emergencia para la reducción del uso del agua entre las máquinas.

- Falta de control del agua en pantalla del DCS: Sabiendo que el control de la máquina es complejo debido que la forma de control del proceso es antigua, existe un problema asociado al agua, enfocado a las paradas de la máquina. Un problema asociado es la apertura de algunas válvulas automáticas, cuyos cables de comunicación se encuentran cortados, por ejemplo, el agua industrial que alimenta al intercambiador de calor superior en uno de los ventiladores de la máquina, donde la válvula reguladora se encuentra desconectada:



Figura 47: Conexión cortada a la válvula de agua industrial que alimenta al intercambiador de calor.

Detalles como el control de esta conexión, sumado a los vistos en las bombas de vacío (salida hacia canaleta), permitiría disminuir el consumo específico en la máquina, refiriéndose a los consumos existentes cuando hay una parada de máquina, programada o no.

A modo de resumen, la MP1 puede ser reducir su consumo específico de agua en gran magnitud, cuyos valores se asemejan a los presentados en la siguiente tabla:

Tabla 29: Ahorro de consumo específico de agua al implementar las soluciones propuestas en la MP1. Se utiliza como producción promedio el valor de 70.54 [ton/día].

Escenario	Flujo de agua [L/min]	Flujo de agua [m ³ /día]	Consumo específico [m ³ /día]
Situación inicial	2200	3168	44,91
Ahorro de agua con torre de enfriamiento	600	864	12,25
Ahorro de agua con filtros operando	350	504	7,14
Situación final	1250	1800	25,52

5.4.2 Preparación de Pasta 1 (PPA1)

En la zona de PPA1, son pocos los equipos que utilizan agua industrial para su funcionamiento. Entre ellos, hay un equipo en particular que presenta un problema visible al momento de recorrer la zona, el cual posee una posibilidad de mejora:

- Modificación en sistema de intercambiador de calor: Existe un consumo de agua asociado a la transferencia de calor para enfriar el aceite utilizado en el motor de accionamiento de la hélice del *pulper* de papel reciclado. Actualmente esta conexión de agua mantiene la temperatura del aceite menor a 40°C. Sin embargo, el caudal utilizado y eliminado a piso es de 58 [m³/día], con una temperatura levemente superior a la de entrada, cuyo aumento de temperatura es de 1-2°C. Es por esto que se recomienda instalar un sistema que contempla una termocupla dentro del intercambiador de calor y una válvula reguladora a la salida del intercambiador de calor, la cual es cerrada para evitar descargar un flujo de agua masivo. El agua retenida alcanza la temperatura del aceite y es descargada con un valor de flujo menor. Esta idea fue implementada en la planta de Puente Alto, pero el flujo de pérdida de agua era mucho mayor (cercano a los 150 [m³/día]), por lo que dependiendo de la cotización del sistema convendrá instalarlo o no, pues el flujo de agua en cuestión es relativamente pequeño (58 [m³/día]).



Figura 48: Intercambiador de calor y flujo de agua descargado a piso en Preparación Pasta 1.

5.4.3 Caldera de vapor

El vapor es ampliamente utilizado tanto en las máquinas papeleras como en las áreas de preparación pasta. En particular, la MP2 posee consumos diferentes en configuración Crescent Former y Atmos, ocasionado por el sistema de secado, ya que en configuración Atmos se utiliza la capota Atmos, aumentando el consumo en un 30%. En vista de lo anterior, es importante tener un flujómetro de agua dirigida hacia la caldera, de modo de estandarizar los consumos asociados para las 3 máquinas papeleras en conjunto a través del vapor consumido. Así, se puede estimar de manera más precisa el impacto del flujo de condensado que no es devuelto a la planta térmica, hecho que sucede en la MP1 y MP2, donde el condensado es descargado hacia canaleta debido a una falla en el sistema y piping de las bombas impulsoras hacia la planta térmica.

Actualmente existe un proyecto asociado que permite recuperar dicho condensado a través de modificaciones en el sistema y balances de presión (energía) del sistema, a través de las bandejas calientes que recirculan vapor.

Por último, el consumo de agua en la caldera no está considerado en el consumo específico de agua de las máquinas, por lo que el estudio del retorno del condensado de la MP2 no tendría efecto en la meta de la empresa, aunque ahorraría agua de manera global.

5.5 Costos parciales e impactos de consumo de agua

Los costos parciales involucran cotizaciones y compras que se realizaron a lo largo del estudio global, tanto para la MP2 como para la MP1. Las mantenciones y trabajos realizados por personal propio de la planta no se contabilizan, de esta manera, el costo real es asociado a los elementos necesarios en el proceso adquiridos a través de empresas externas, nombradas a continuación:

- Para la implementación del diagrama de aguas en el DCS, se cotizaron 9 flujómetros en conjunto con la instalación del instrumento y el cableado eléctrico necesario, cuyos valores aparecen a continuación:

Tabla 30: Costos de los flujómetros según diámetro. Datos obtenidos desde cotización.

Diámetro flujómetro [in]	Ubicación de medición	Precio unitario [USD]	Instalación y cableado eléctrico [USD]	Valor total [USD]
2	Caldera	1700	2300	4000
4	Efluentes	2000	2300	4300
4	PPA1+Efluentes	2000	2300	4300
4	Conversión	2000	2300	4300
4	Vacío MP1	2000	2300	4300
4	PPA3	2000	2300	4300
6	MP1	2300	2300	4600
6	MP2	2300	2300	4600
6	Agua Potable	2300	2300	4600
Total	-	18600	20700	39300

- Para la implementación del diagrama en el DCS de las máquinas, se necesita a un programador contratado que modifique los servidores centrales, el cual agregará los TAGS de los equipos mencionados en cada máquina y la imagen del equipo correspondiente. Dado que se deben confeccionar 4 pestañas de información nueva en cada máquina papelera, se estima que las horas de trabajo requeridas serán entre 20 a 40. Dado que la empresa contratista tiene un costo asociado a la Hora Hombre (HH) con un valor de 2 UF/hora, el costo total será de 80 UF (eligiendo el peor escenario posible), equivalente a 3200 [USD].
- Para mantener operativo los motores reductores del giro presentes en el espesador EE-324 y además, para controlar la humedad generada por el espesador de recortes de la MP2 ubicado al costado, se cotizó la confección de una tapa, para evitar dicha propagación de la humedad, cuyo diseño fue elaborado por el supervisor asistente de la MP2. La cotización fue realizada en Enero y no tiene respuesta a la fecha.
- Las mallas para prevenir la entrada de basura al tanque TQ-322 desde las canaletas del piso subterráneo de la MP2 tienen un costo asociado de acuerdo al tamaño de los orificios y el área que debe abarcar. Se puede construir en base a un soporte metálico rectangular que coincida con las dimensiones de la canaleta y que posea la malla filtradora. El soporte puede ser construido en el taller mecánico, mientras que el valor de la malla es de 12 [USD] [29].
- El uso de un agente microbicida para el uso del agua de efluentes y al agua industrial, de acuerdo a los estudios para determinar la cantidad y variedad de microorganismos presentes en las aguas. El estudio no tiene un costo asociado

para la empresa, pero en caso de necesitar el agente microbicida, se necesita la instalación de una bomba dosificadora y de agitación en el tanque TQ-381. La cotización fue realizada en Febrero y no tiene respuesta a la fecha.

- El cambio de configuración de la bomba BB-314, consistente en la instalación del empaquetamiento interno de la bomba. Esto fue cotizado en Octubre del 2018, con un valor de 6000 [USD].
- Filtro de microplásticos, cuya orden de compra fue realizado en Diciembre del 2018. El costo del equipo es de 26600 [USD], el cual debe llegar a la planta en Marzo del 2019.
- La bomba que alimenta al tanque TQ-381 en la nueva configuración del traslado del agua de efluentes hacia las máquinas (BB-Nueva de la Figura 43), la cual tiene un valor aproximado de 3000 [USD].
- La torre de enfriamiento de la MP1, sin incluir costo de envío, instalación, piping ni cableado eléctrico. El costo de la torre es de 18130 [USD] [30].
- La bomba alimentadora de la torre de enfriamiento de la MP1, cuyo flujo levantado debe ser de 600 [L/min]. El valor aproximado para esta bomba es de 3000 [USD].
- El agitador y el control de nivel para el tanque TQ-381, el cual necesita autorización del jefe de fabricación para emitir la cotización.

Tabla 31: Cuadro resumen de los costos totales de los elementos que aportan a la reducción del uso de agua industrial. Se fija 1 UF = 40 dólares, valor en febrero 2019.

Elemento cotizado	Costo unitario [USD]	Cantidad	Costo parcial [USD]
Compra e instalación y cableado de flujómetros de agua fijos	Depende del diámetro	9	39300
HH programador para DCS	2 UF/hora	40 horas	3200
Cotización tapa espesador de recortes	Sin respuesta	1	Sin respuesta
Cotización mallas en canaleta	12	1	12
Estudio microbiológico realizado por empresa externa	Sin costo	5	0
Agente microbicida introducido al agua de efluentes	Sin respuesta	-	Sin respuesta
Cambio de configuración en BB-314 (empaquetamiento interno)	3000	2	6000
Filtro de microplásticos para el agua de efluentes	26600	1	26600
Bomba para la implementación del agua de efluentes (BB-Nueva)	3000	1	3000
Cotización Torre de Enfriamiento en MP1	18130	1	18130
Cotización Bomba alimentadora de la Torre de Enfriamiento en MP1	3000	1	3000

Agitación y control de nivel para el tanque TQ-381	Sin información	1	Sin información
Total	-	-	99242

Para la evaluación económica se consideran exclusivamente los costos, debido a que el ingreso por concepto de ahorro de agua industrial posee un valor social relacionado a la sostenibilidad de los sistemas medioambientales naturales cercanos a la planta y además, de la mejora de la imagen medioambiental de la empresa (a través de la meta impuesta para el año 2020) y del compromiso realizado con el Pacto Mundial de la ONU. De este modo, los ingresos son complicados de expresar y calcular, por lo que la empresa requirió exclusivamente de los costos asociados al implementar las soluciones para disminuir el consumo del agua.

Por último, implementar todas las soluciones mencionadas en este trabajo (considerando las soluciones puntuales implementadas en la MP2, operación del filtro de arena en MP2, operación de los filtros de la MP1, instalación de torre de enfriamiento en MP1, y utilización del agua de efluentes para la MP2 y MP3) los consumos de agua podrían alcanzar lo expresado en la siguiente figura:

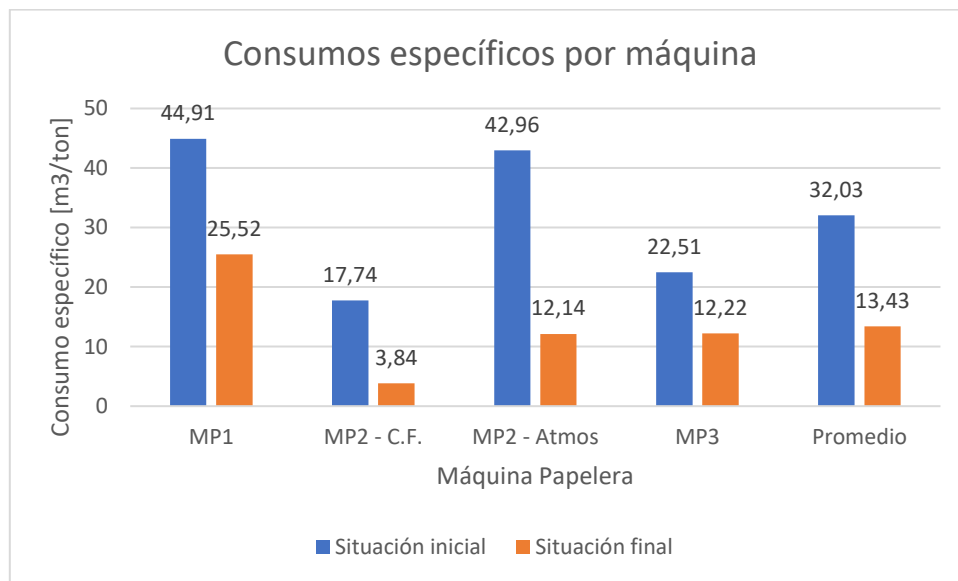


Figura 49: Consumos específicos finales si se implementan todas las soluciones propuestas.

5.6. Discusiones generales

A continuación, se presentan discusiones generales, asociados tanto al consumo de agua en la MP2 como a nivel planta:

5.6.1 Discusiones en torno a la MP2

Las siguientes discusiones se fundan en la operación del proceso, mediciones y precauciones a considerar para mantener estabilidad con respecto al consumo de agua:

- Válvulas manuales de agua industrial abiertas: A través de los resultados encontrados en la reducción del agua industrial, los principales consumos fueron asociados al cierre de válvulas manuales, cuyas conexiones no eran necesarias de mantener abiertas a los equipos asociados. Esto se refiere al descuido y/o al desconocimiento de las conexiones existentes que se encuentran abiertas, por ejemplo, la conexión directa al despiche del silo TQ-314, el cual es utilizado eventualmente para eliminar el exceso de espuma que se genera en el proceso y que debe cerrarse una vez que la espuma es eliminada. En particular esta conexión utiliza una gran cantidad de agua y no es cerrada cuando corresponde. De esta manera, se sugiere informar a los operarios de estas conexiones de agua industrial, pues no se preocupan de cerrar las válvulas una vez que ya no se utilizarán por un tiempo.
- Forma de estimar el consumo específico: El consumo de agua permanece relativamente estable independiente del papel que se esté fabricando, pero la producción puede variar significativamente por día regido por los criterios de calidad, tales como presencia de hoyos, microhoyos, *stickies*, rechazo en el bobinado o pope, baja velocidad en producción de Atmos, etc. De esta manera, reducir el consumo de agua específico depende directamente de la cantidad de agua utilizada y de la producción, así, si hay consumo específico elevado, no implica necesariamente que haya un gasto de agua industrial mayor, sino que la producción de papel es menor. Para ello, es pertinente tener un flujómetro que indique el consumo de agua promedio de acuerdo a la utilización de la máquina y enfocar los problemas de la tendencia de los rechazos del papel.
- Error en las mediciones de flujos: El instrumento de medición de caudales entrega información con un grado de error debido a que la señal emitida no alcanza el 100% de calidad, es más, fluctúa entre el 75% al 91% de exactitud. Estos valores indican que el instrumento no es preciso con respecto a las mediciones, por lo que existe un error en los valores medidos.
 - Consumos generales en planta: El balance de agua global contempla un error humano debido a que las mediciones no se tomaron de manera simultánea, pues existen perturbaciones en el sistema del agua al abrir o cerrar una válvula, generando cambios en la presión del fluido y modificando las velocidades durante la medición.
 - Consumos por máquina: En específico para la MP2, existen consumos discontinuos que pueden ser medidos exclusivamente a través de los niveles de los tanques. Debido a perturbaciones y paradas en la máquina, estos consumos suelen ser diferentes de acuerdo al problema encontrado, por lo que los consumos reales pueden ser visualizados a través de un totalizador. Es decir, la medición actual no es correcta porque las mediciones se realizan en horario administrativo (desde las 8:00 hasta las 17:00), mientras que los consumos ocurren durante las 24 horas del día, obteniendo información inconsistente al realizar las mediciones día a día.

- Gestión lenta de implementos y repuestos: Ante emergencias, categorizadas de forma disjunta a la producción de papel (es decir, situaciones que no afectan a la producción de papel de manera directa), la gestión de los repuestos o requerimiento de trabajos mecánicos es lenta, pues siempre se entregará prioridad a las fallas propias de la producción de papel. Esto sucedió con el arreglo de la válvula reguladora de agua industrial del tanque TQ-336, donde el periodo de tiempo entre notificar el problema y solucionarlo tomó 2 meses.
- Efecto de las bombas a instalar en tanque TQ-336: La necesidad de que el filtro de arena recupere agua superclarificada se origina debido a que se instalará otra bomba asociada al tanque TQ-336, por lo que el consumo de agua industrial aumentaría si los equipos continúan fuera de servicio, aumentando considerablemente el consumo específico de agua para la configuración de Atmos. Sin embargo, la instalación de la bomba se requiere para aumentar la cantidad de regaderas de alta presión que existen en la máquina, lo cual ayuda a eliminar contaminantes que se impregnen en las vestimentas de la máquina y así, existiría un menor rechazo de papel convertible, aumentando la velocidad de producción de papel. De esta manera, la instalación de la bomba no debe considerarse como un consumo extra de agua, sino que permitiría reducir el consumo específico de agua debido a que la producción en Atmos aumentará. El efecto de la instalación de esta bomba en los cálculos de los flujos de agua industrial se encuentra en la Sección 5.1.6 Impactos de ahorro de agua en consumos puntuales).
- Operación del filtro de arena: Dado que el filtro de arena es el principal equipo responsable de la disminución del uso de agua industrial, se plantea como hipótesis que el filtro de arena falla debido a la compactación de la arena por la presencia de partículas grandes, dado que se analizaron posibles problemas que pueden ocurrir de manera paralela, como el diseño del equipo y la arena utilizada:
 - Se descarta el problema de la arena pues se realizó un estudio granulométrico breve que indica que la arena cumple con la esfericidad adecuada con un tamaño entre 2-3 [mm].
 - El diseño del equipo es idóneo en la actualidad debido a que el agua ingresa de manera tal que debe recorrer gran parte del lecho de arena, es decir, posee un tiempo de residencia acorde a lo estipulado al catálogo de operación, siempre y cuando se utilice un flujo de alimentación de 600 [L/min] y la instrumentación del empleo del aire comprimido para las bombas de succión de arena se encuentren operando adecuadamente.

Con lo anterior, se plantea como supuesto principal la compactación de la arena causada por la falla del sistema de clarificación, por lo que poner en funcionamiento el fraccionador de fibras y el espesador debería solucionar el problema de manera parcial, en conjunto con el lavado programado del filtro.

Debido a que los flujos de agua manejados en el área de clarificación son menores a los estipulados por diseño (ver Sección 5.2 Eficiencias de equipos fuera de

servicio en MP2), el sistema debe operar con un filtro de arena, pues si los 2 se encuentran operando de forma paralela habrá un consumo de agua clarificada mayor, por lo que el nivel del tanque de agua clarificada bajaría (TQ-331) y abriría la válvula de agua industrial de manera automática para aumentar el nivel, utilizando un flujo de agua mayor a la ahorrada por el funcionamiento de los filtros.

Por otro lado, la programación del lavado es sustancial una vez que se implemente la operación del espesador, pues es necesario asegurarse de que el agua clarificada no posea una gran cantidad de partículas grandes. Esta acción depende de la acción conjunta del jefe de la máquina y los instrumentistas de la planta, pues el filtro posee la configuración para realizar el lavado aunque se debe revisar que las conexiones eléctricas de las válvulas involucradas.

- Cálculos en el sistema de clarificación: Los cálculos relacionados a los equipos de clarificación se realizan de manera empírica debido a que las variables de diseño se encuentran modificadas (flujos volumétricos y máscicos), por lo que estimar la eficiencia a partir del catálogo resultaría incorrecto. Por otro lado, los cálculos realizados con respecto a los valores teóricos resultan discordantes con los reales debido a varios supuestos (referido a la Tabla 16 y a la Tabla 17):
 - El balance de masa se realizó de manera incorrecta al momento de diseñar el proceso, de acuerdo a lo observado en los diagramas de flujo de la máquina. Esto puede significar que el circuito de clarificación se haya mantenido inestable en el pasado, al menos para el fraccionador de fibras.
 - En el pasado existía una mayor cantidad de fibra corta que la que circula en la actualidad, indicando un gran valor de consistencia en el flujo de agua de finos del fraccionador (F3 en la Tabla 16). Debido a que no se toma en consideración la medición de la cantidad de fibra corta y larga, es posible suponer que la eficiencia de separación de masa era baja, pero la extracción de la fibra larga de la corta era efectiva, obteniendo una masa de fibra corta mucho mayor que la de fibra larga.
 - Los flujos de diseño son mucho más grandes que los que se utilizan actualmente, indicando la diferencia en la alimentación a través del flujo F1. Esto es un cambio propio de la máquina, pues el flujo F1 contiene agua blanca extraída desde el pozo de la máquina, a través del desgote mecánico de los polines y rodillos existentes. Este cambio puede haber sido originado cuando la MP2 adoptó la configuración de Atmos en el año 2004, donde pudo haber existido un cambio en los flujos de todo el proceso.

Si bien existe cierta incertidumbre de lo que sucedió en el diseño del proceso, el estudio de los flujos reales resulta inconcluso debido a la falta de medición de la fibra útil de cada flujo, el cual puede verificar la presencia de la fibra útil que recupera cada equipo y entregaría una respuesta fidedigna con la situación del agua clarificada. El estudio de la fibra corta no pudo ser realizado debido a la lentitud de la compra de los repuestos del espesador. Sin embargo, la eficiencia

de recuperación real se considera alta entre ambos equipos, pero para mantener precaución al momento de operar el filtro de arena, es necesario realizar el estudio de la extracción de partículas grandes en el clarificador una vez que el fraccionador de fibras y espesador operen de manera regular.

- **Mantenimiento del sistema de clarificación:** Mantener una buena ejecución y control de sistema de clarificación de aguas permite recircular la fibra útil evitando su presencia en el agua clarificada. Esta mantención consta de la participación de los operarios en realizar las mantenciones periódicas al fraccionador de fibras, espesador y filtro de arena, operando los equipos a condición base sin necesidad de adquirir nuevos equipos o implementos para su funcionamiento (Ver 5.2.4 Recomendaciones para mantenimiento de operación). Si bien se realizó el estudio de la recirculación de fibras en vez de solucionar el problema con el filtro de arena directamente, la recomendación para el sistema es mantener la operación del fraccionador de fibras y el espesador, con el objetivo de corroborar la separación de las fibras largas a una eficiencia mayor al 76%, pues el clarificador debe tener un efecto sobre el 24% restante, equipo que no se estudió. Una vez que el sistema muestre resultados positivos con respecto al agua obtenida desde el clarificador, se recomienda operar el filtro de arena, programando los lavados expresados en la sección de resultados.
- **Aspectos operacionales humanos:** Asegurar un consumo bajo de agua por parte de la empresa no depende solo del rol de la ingeniería de los procesos, basado en cálculos y proyecciones a futuro, sino que dependen de los operarios que manejan el control de la producción del papel, pues el 75% del consumo de agua en la planta se atribuye al área de fabricación. Si bien, se han realizado estudios para demostrar que se puede reducir el consumo de agua en la MP2 utilizando los equipos propios del proceso, y además de implementar un sistema de control del agua en las pantallas de control en la máquina, depende de que los operarios y jefe de línea tomen la iniciativa para manejar el control del agua, a través de soluciones en forma de mantenciones necesarias a los equipos involucrados. Por otro lado, existe una problemática ética al momento de priorizar los problemas encontrados en la producción de papel: pocos operarios se preocupan de mantener el cuidado de los múltiples recursos utilizados para fabricar papel. El problema anterior se traduce en que el operario siempre tendrá como prioridad producir papel en vez de resolver problemas encontrados a los procesos paralelos que no afectan directamente a la fabricación del papel. La solución propuesta consiste en delegar responsabilidades al área de sustentabilidad de la planta, pues se caracterizan por realizar capacitaciones que informen los daños y proyecciones a futuro de la falta de algunos de los recursos, tanto a nivel empresarial como medio ambiental. Esto no incluye solamente el gasto del agua en la planta, sino que otros recursos necesarios como el gas natural y el petróleo, elementos que no son regulados al momento de producir papel.

Además, agregar a las tareas diarias la mantención del espesador y el filtro de arena, equipos que se han mantenido fuera de servicio por varios años, implica una mayor carga de trabajo a lo que ya tienen actualmente. Es por esto que existe una falta de preocupación de los operarios para mantener operativo estos equipos, pues requieren de un mantenimiento periódico extra para lograr cumplir el objetivo.

5.6.2 Discusiones en torno al uso del agua de efluentes

Las discusiones siguientes se centran en lo estudiado con respecto al uso del agua de efluentes a la red de agua industrial:

- Análisis microbiológico del agua de las napas subterráneas y de efluentes: La importancia del estudio radica en que las planificaciones para realizar este cambio de configuración en el piping del agua industrial ya han comenzado, pero no se han realizado los estudios pertinentes para analizar la existencia de microorganismos que pueden afectar a la funcionalidad de los equipos que utilizan agua industrial (corrosión y suciedad en sellos mecánicos de algunas bombas, intercambiadores de calor, entre otros), incluso afectar en la calidad del papel por la presencia de hoyitos debido a que las regaderas se pueden tapar al tener microorganismos presentes en el agua de limpieza.
- Nula respuesta del laboratorio externo: A la fecha no ha habido respuesta del laboratorio externo con respecto a los estudios microbiológicos. Sin embargo, sirve como experimentación la conexión actual para ver el funcionamiento del filtro de microplásticos, observando su efecto en la torre de enfriamiento y la operación de la prensa de lodos. Para ello, se recomienda la operación de esta configuración (sin la actuación del microbiocida) durante 1 mes, para probar la eficacia del filtro de microplásticos.
- Factibilidad de utilizar agua de efluentes en la red de agua industrial: Al momento de analizar los posibles efectos de utilizar el agua de efluentes en la red de agua industrial, se encuentran problemas que debiesen ser solucionados de forma previa antes de la implementación de la propuesta:
 - A pesar de tomar los resguardos necesarios con los plásticos grandes originados en la MP3, los microplásticos y los microorganismos, aún persisten problemas con respecto a las perturbaciones propias de la planta de efluentes, como las modificaciones en los caudales y concentraciones de lodos de llegada. Si el control del agente microbiocida y el filtro de microplásticos no es estricto, pueden desencadenarse problemas en algunos equipos y etapas de preparación pasta que utilizan agua industrial por la presencia de microorganismos o plásticos, principalmente a los equipos que utilizan un sistema hidráulico (intercambiador de calor), debido a que la presencia de partículas en exceso en el agua provocaría taponamientos y obstrucciones en el equipo encargado de la transferencia de calor con el aceite de los motores. Al no ocurrir la transferencia de calor de manera eficiente, el aceite puede regresar al equipo con una

temperatura mayor, traducido en una inestabilidad térmica del equipo. Esto puede ocasionar fallas en el motor principal en equipos como el dispersor, el reductor y el enfriador del aceite del Yankee. Para ello, el control estricto debe realizarse en el tanque TQ-381, el cual no posee control de nivel, agitación ni lazo de control con la bomba BB-380, el cual es necesario a futuro.

- De forma paralela, surge otro problema relacionado a la recirculación masiva de aguas entre máquina papelerera y planta de efluentes, el denominado *pitch* o *sticky*. El *pitch* es un conglomerado orgánico heterogéneo que tiene la característica de adherirse al papel en forma de pinta pegajosa, compuesto principalmente con carbonatos, plásticos, materiales sintéticos, resinas, entre otros, y originado por el uso de algunos antiespumantes y la acumulación progresiva de residuos. Además, estas partículas presentan carga negativa, desestabilizando la dispersión y formando depósitos pegajosos y oscuros, tanto en el papel como al interior de los equipos que utilicen esta agua. Para ello, en caso de que se detecte la presencia de estas partículas, es necesario realizar un estudio para determinar su origen inorgánico (generalmente asociados a elementos catiónicos) una vez que se implemente el proyecto [31]. Si no hay control, puede provocar problemas a mediano – largo plazo tales como contaminación de las vestimentas de la máquina, inestabilidad en los clarificadores, incrustaciones en el piping del proceso, taponamiento excesivo del empaquetamiento de la torre de enfriamiento, entre otros.

Como recomendación, se propone seguir con la implementación del filtro de microplásticos y los estudios microbiológicos en el agua de efluentes, pero no se debe agregar directamente el agua de efluentes al agua industrial, debido a la cantidad de variables que se deben manejar y que no se han considerado hasta el momento. La idea de desarrollar este proyecto es para ver su efecto en la torre de enfriamiento de la MP2, cuyas conexiones se mantienen según lo planeado. A raíz de lo anterior, la torre sería un experimento para revisar la eficiencia del filtro de microplásticos a través de los periodos de mantención en los rellenos del equipo, además de presenciar los microorganismos (microalgas principalmente) que pueden aparecer. Si en un periodo de 3 meses la torre de enfriamiento no presenta problemas con ambos aspectos operando, sería recomendable dar partida al sistema de control en el tanque de agua industrial incluyendo el control microbiológico.

5.6.3 Discusiones en torno a otras soluciones encontradas

Las discusiones se centran a las soluciones centradas en el control del uso del agua y la situación con respecto a la MP1:

- Control de operación: La implementación de los diagramas de las 3 máquinas papeleras ayudará a manejar el consumo de agua de manera total y particular en cada máquina, operado por los mismos operarios a través de una interfaz sencilla

e indicativa de los consumos existentes. Para ello será necesaria una pequeña capacitación a los operarios de las 3 máquinas para indicar el uso de la pantalla, las conexiones existentes y recibir opiniones con respecto a los diagramas (facilidad de uso, figuras, etc.).

- Agua industrial en la MP1: Al momento de realizar el estudio en la MP2, existió un periodo de tiempo corto para analizar el consumo de agua en la MP1, a pesar de no ser un objetivo de trabajo. Basado en las mediciones realizadas, se recomienda que la empresa debe considerar un plan de reducción con las 2 propuestas redactadas para reducir el consumo de agua global a través de la MP1, dado que posee el mayor consumo específico entre las 3 máquinas papeleras. Si bien el trabajo se enmarcó en la MP2, es importante mantener el contacto con la empresa para entregar detalles de las problemáticas encontradas en la MP1, debido a que las soluciones involucran grandes análisis y cotizaciones a mediano - largo plazo. Es necesario recalcar el problema encontrado en la MP1, pues posee una mayor magnitud de impacto que la propuesta con respecto al uso del agua de efluentes, pues esta agua es considerada para reducir el consumo de la MP2 y MP3, las cuales no poseen grandes consumos de agua actualmente. Finalmente, la situación con esta máquina debiese integrarse al plan de sustentabilidad de la planta, pues las propuestas actuales no la consideran como fuente de problemas.

6 Conclusiones

La metodología de trabajo realizado en planta entregó los indicios necesarios para conocer los consumos de agua existentes a nivel planta y MP2, a través de la clasificación de los usos del agua a lo largo del proceso. Asimismo, gracias a la metodología de trabajo y a los instrumentos de medición utilizados, se puede realizar el diagnóstico del uso del agua de las 3 máquinas papeleras, corroborando que el consumo específico de agua promedio en cada máquina es de 32 [m³/tonelada], similar al entregado por los informes realizados en la planta de agua. Por otro lado, estas mediciones permiten argumentar que los sobreconsumos de agua existentes entre las máquinas se adjudican principalmente a la MP1 y no necesariamente a la MP2, hecho que se confirmará a futuro con la lectura de los flujómetros de agua industrial a instalar en cada una de las máquinas. Además, la clasificación del uso del agua permite definir de forma clara las variables que pueden ser modificables a corto plazo, tales como los del tipo Entrada – Make Up, las cuales permiten reducir el consumo de agua en gran cantidad, relacionado a lo sucedido en el circuito de clarificación de aguas propio de la máquina.

Los estudios y recomendaciones realizados en torno a la reducción del consumo de agua de la MP2 se centran en la operación del proceso, más que en el diseño del mismo. Esto se puede corroborar con la problemática originada por la fracción del circuito de clarificación de aguas de la máquina inoperativo, donde 3 equipos se encuentran fuera de servicio. A pesar de que las gestiones para operar nuevamente esta parte del proceso son lentas, los resultados proyectados afirman la reducción del uso del agua por la operación del filtro de arena, dado que el funcionamiento del fraccionador de fibras y el espesador correspondiente (FF-324 y EE-324) permitiría eliminar el 76% de las fibras largas del agua blanca, evitando la compactación del lecho de arena por la presencia de partículas grandes en el agua limpia proveniente del clarificador. Por lo anterior, se recomienda operar el espesador EE-324 y un mes después, operar el filtro de arena con el lavado programado, de manera de establecer la operación correcta del espesador y realizar los estudios de muestreo respectivos, para corroborar que el clarificador entrega agua clarificada libre de partículas grandes, antes de ingresar al filtro de arena. Por último, se debe operar un solo filtro de arena, debido a que el circuito de clarificación no maneja una gran cantidad de agua para todos los equipos asociados, además de que el flujo de agua superclarificada generada por el filtro es de 520 [L/min], coincidiendo con lo requerido por el tanque TQ-336, cuyo uso de agua es para las regaderas de alta presión de la máquina (bomba existente y bomba nueva a instalar), con un flujo aproximado de 510 [L/min].

Además, es importante tener el manejo online de los usos de agua en la máquina, para poder cerciorar algún sobreconsumo a raíz de un problema de emergencia en el proceso. Para ello, los diagramas de agua industrial en el DCS para cada máquina podrán entregar información acerca del uso de manera instantánea, a través de la visualización del estado de válvulas y alturas de nivel de algunos tanques que utilizan agua industrial con una interfaz sencilla para los operarios (Ver Anexo E: Pantallas de control de agua industrial

en máquina). Al tener la información en línea se podrá saber de manera instantánea los usos del agua y los consumos específicos por máquinas, y revisar el balance másico de agua total para asegurar una buena lectura de los flujómetros a instalar.

Con respecto al uso del agua de efluentes para alimentar la red de agua industrial de la MP2 y MP3, resulta complejo de concebir y manejar, debido a la gran cantidad de variables que se deben controlar, tanto antes como después de la posible implementación del sistema de control:

- Antes, debe existir un control estricto con respecto a los posibles problemas que pudiesen originar por la presencia de microplásticos y microorganismos, desencadenando más problemas de operación que soluciones estables. Este problema a realizar un lazo de control de nivel entre el tanque TQ-381 y la bomba BB-380, incluir agitación en el tanque TQ-381 y un control total de la dosificación del microbiocida en el tanque TQ-381 para erradicar la mayor cantidad de microorganismos posibles. Además, de extender el piping desde la bomba BB-381 hacia el tanque TQ-502, y adquirir y programar la válvula reguladora de la entrada hacia el tanque TQ-502.
- Después, con la instalación planeada, el consumo de agua industrial disminuiría, aumentando el grado de recirculación de las aguas del proceso, fomentando la aparición del pitch, compuesto pegajoso complicado de controlar generado por la acumulación gradual de residuos.

Además, el sistema resulta ser inestable con respecto al agua de efluentes, pues a menudo existen problemas de caudal (cuando una máquina se detiene), composición y turbidez, presencia de espuma, entre otros, por lo que agregar estas variables a un tablero de control resulta complejo, más aún cuando los problemas aparecen de manera conjunta.

Con lo anterior, se recomienda no realizar el proyecto de la integración del agua de efluentes por el momento, pues aún existe incertidumbre con respecto al control de esta parte del proceso. Por otro lado, el sistema puede implementarse como versión piloto de manera exclusiva hacia la torre de enfriamiento de la MP2, manteniendo las conexiones existentes desde el tanque TQ-381. Esto es para calificar la calidad del agua de entrada hacia el equipo y observar los problemas que podrían existir si el uso del agua se amplía hacia las 2 máquinas, además de observar el funcionamiento del filtro al vigilar los rellenos de la torre de enfriamiento, los cuales se tapan de manera recurrente con plásticos.

En el caso aislado de la MP1, la empresa pudo percatarse el origen real del problema del consumo del agua, pues los planes de acción actuales no estaban enfocados a dicha máquina. Las propuestas mencionadas en este estudio fueron integradas a un plan de acción nuevo, el cual posee una mayor prioridad que la recirculación del agua de efluentes debido a que el consumo promedio podría reducirse hasta alcanzar la meta del consumo específico promedio de 20 [m³ agua/tonelada papel]. La rápida acción de la planta en considerar las propuestas podría dar chances de cumplir la meta antes del año

2020, a pesar de que falta profundizar en los estudios de los problemas y de la adquisición de los equipos necesarios, pues se consideran gestiones lentas.

Es relevante destacar la importancia de los operarios, debido a que ellos son los que deben realizar o gestionar las labores de mantención en los equipos estudiados en este trabajo. Mantener el consumo de agua específico bajo depende netamente de la gestión del tiempo de ellos, tanto para priorizar el uso de agua clarificada por sobre la industrial como por la operación del fraccionador de fibras, al espesador y al filtro de arena. De esta forma se evita la compra de nuevos equipos, pues la eficiencia de los existentes resulta suficiente para lo requerido por el proceso. Así, se recomienda que el jefe de la máquina procure mantener un calendario de programación de mantención exclusivo para el circuito de clarificación, pues los problemas operacionales asociados a los consumos de agua de la MP2 pueden resolverse con una buena gestión del tiempo y con el compromiso de los operarios de realizar todas las tareas asignadas.

A modo de resultado final, gracias a las mediciones realizadas en terreno, los consumos específicos del agua en la MP2 se pueden estandarizar sin considerar lo producido por la MP1 y la MP3. De acuerdo a lo anterior, no se considerará la utilización del agua de efluentes para los cálculos finales, debido a lo expuesto previamente. De todas formas, se pueden construir las siguientes tablas de datos, definiendo 3 situaciones:

- Situación inicial: Se refiere al escenario inicial, sin modificaciones al proceso.
- Situación actual: Se refiere al escenario con las modificaciones puntuales realizadas, es decir, sin considerar lo estudiado en el circuito de clarificación de aguas. Además, se agrega la situación en que la bomba de alta presión asociada al tanque TQ-336 es instalada sin tener el filtro de arena operativo, constituyendo un mayor consumo de agua industrial en la máquina.
- Situación final: Se refiere al escenario considerando todas las propuestas mencionadas en el estudio, alcanzando el estado óptimo, definido como la situación en que no se puede reducir más el consumo de agua.

Tabla 32: Situación inicial, actual y final con propuestas en Crescent Former, considerando una producción promedio de 73,87 [ton/día].

Escenario	Flujo [L/min]	Flujo [m³/día]	Consumo específico [m³/ton]
Situación inicial	909,93	1310,3	17,74
Ahorro con soluciones puntuales	392,85	565,7	7,66
Situación actual teórica	517,08	744,59	10,08
Medición en terreno en situación actual	551	793,44	10,74
Medición actual con bomba de alta presión instalada (filtro no operativo)	821	1182,24	16
Situación final con filtro operativo	402,85	580,1	7,85

Tabla 33: Situación inicial, actual y final con propuestas en Atmos, considerando una producción promedio de 34,18 [ton/día].

Escenario	Flujo [L/min]	Flujo [m ³ /día]	Consumo específico [m ³ /ton]
Situación inicial	1019,83	1468,56	42,96
Ahorro con soluciones puntuales	510,6	735,26	21,51
Situación actual teórica	509,23	733,29	21,45
Medición en terreno en situación actual	564	812,16	23,76
Medición actual con bomba de alta presión instalada (filtro no operativo)	834	1200,96	35,13
Situación final con filtro operativo	431,1	620,78	18,16

De manera más representativa, se adjunta el gráfico que muestra la evolución de la reducción del consumo de agua en las máquinas con las soluciones propuestas recomendadas:

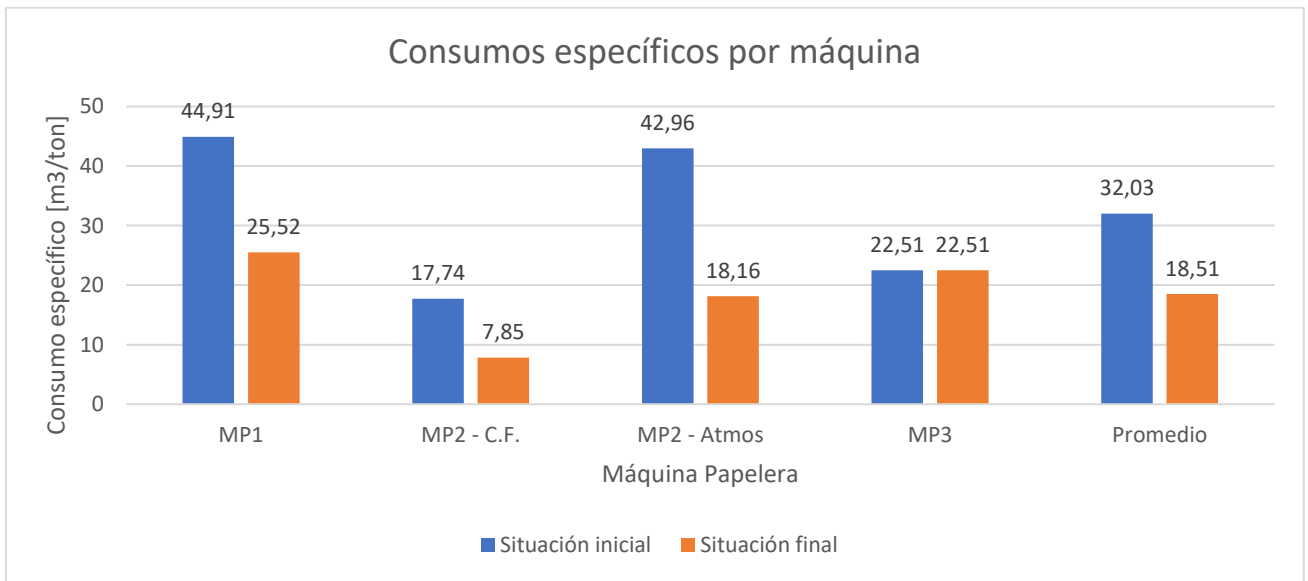


Figura 50: Consumos específicos de agua por máquina si se implementan las propuestas definidas, sin considerar el reemplazo del agua de efluentes.

La evaluación económica detallada en la Tabla 31 muestra que los costos totales para la implementación de las soluciones propuestas sobrepasan los 99000 [USD], valor que se encuentra subestimado debido a la falta de respuestas de algunas cotizaciones.

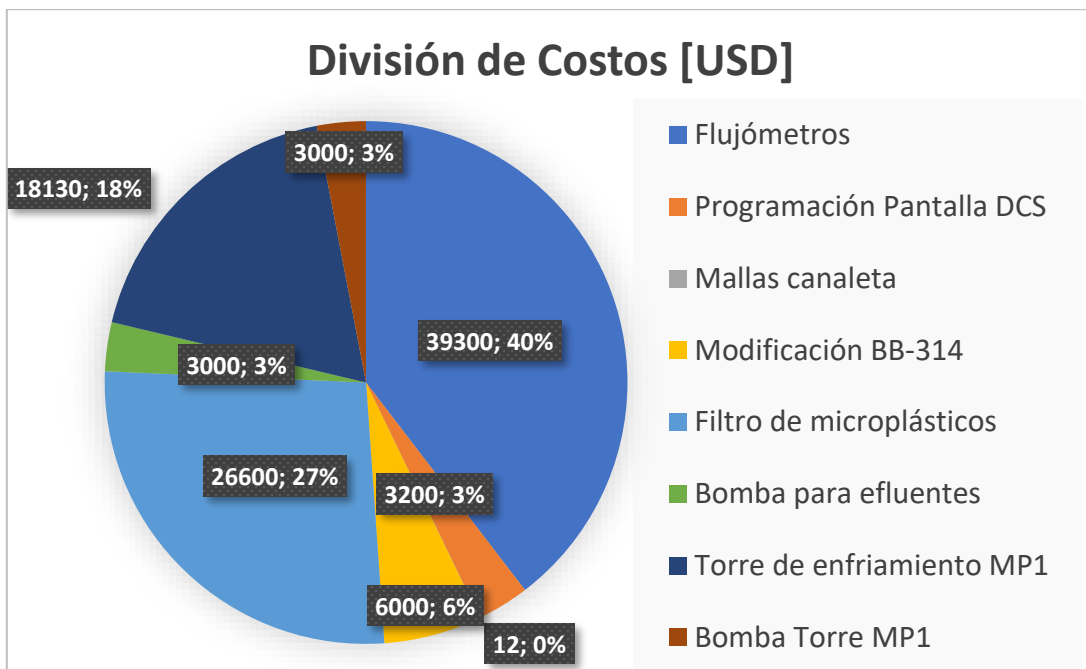


Figura 51: Costos asociados para implementación de soluciones.

Observando el gráfico de costos parciales, la mayor magnitud de costos se asocia a la implementación del sistema de control de las máquinas (43%), el cual es una cifra aceptable destacando que el problema del control del agua puede ser resuelto en las 3 máquinas papeleras. Los costos asociados exclusivamente a la MP2 constan del 36% del total, valor alto a pesar de que no existen grandes problemas de operación. Sin embargo, la adquisición de estos elementos permitiría preservar el consumo de agua industrial bajo en las máquinas, pues el sistema de control da a conocer los problemas para dar una solución rápida, mientras que los equipos comprados se caracterizan por tener una vida útil extendida, siempre y cuando se realicen las mantenciones pertinentes.

Teniendo en consideración las fluctuaciones de los caudales de agua industrial utilizados en las máquinas, es importante valorizar el impacto de la reducción del consumo de agua a futuro, el cual depende netamente de la correcta operación del proceso. Esta valorización puede ramificarse en 2 líneas relevantes, definidas para la empresa y la sostenibilidad medioambiental de la zona:

- Empresa: La búsqueda de alcanzar la meta de la disminución del consumo específico de agua por producción de papel tiene un vínculo con una mejora de la imagen empresarial y corporativa de la compañía, a través de la adopción de principios sostenibles. Además, la empresa se ha adherido al Pacto Mundial de la ONU, comprometiendo cambios al modelo de ciclo de vida de producción de papel. A través de este compromiso, la empresa se ve obligada a reducir el consumo de recursos ambientales, por lo que debe alinear sus objetivos con los trabajadores involucrados directamente en la etapa de fabricación, pues actualmente existe

poco personal de operación que se preocupa por mantener a raya el consumo de agua industrial, así como los otros recursos planteados como objetivos.

- **Sostenibilidad medioambiental:** La definición de sostenibilidad se centra en mantener el cuidado al medio ambiente a través de un menor uso de los recursos naturales, buscando la extensión del uso de los recursos para las generaciones siguientes. Al aplicar este concepto en base al agua industrial, se vuelve urgente minimizar el consumo de agua en la planta debido a que en el año 2013 se realizó un estudio hidrogeológico a las napas subterráneas ubicadas sobre la planta, indicando agotamiento de la napa en la cuenca hidrográfica del río Maipo, declarándose como área de restricción para nuevas extracciones de aguas subterráneas, donde las comunas de El Monte, Talagante, Isla de Maipo, Melipilla, Buin, Peñaflor y Paine se ven afectadas. Una disminución del caudal de extracción permitiría mantener la sostenibilidad del proceso de fabricación de papel a largo plazo, mientras que el efecto en la zona permitiría mayor estabilidad en la agricultura del lugar.

El flujo de agua que consume la planta completa es cercano a los 6500 [L/min], mientras que con las propuestas se puede ahorrar (considerando todas las propuestas a excepción de la recirculación del agua de efluentes) un flujo de:

Tabla 34: Flujo de agua ahorrado al implementar las soluciones propuestas en este estudio.

Zona de estudio	Flujo de agua [L/min]
MP2	507
MP1	950
Efluentes (Prensa de lodos N°3)	240
Recirculación agua de efluentes	1166
Total (sin considerar recirculación)	1697

En este sentido, el flujo de agua industrial se reduce aproximadamente en un 26% con respecto al total, permitiendo un mayor tiempo de sostenibilidad del proceso de las máquinas siempre y cuando la reducción de consumo se conserve y la producción se mantenga.

Finalmente, a largo plazo, será necesario cambiar de tecnologías con el objetivo de mantener un consumo de agua mucho menor, debido a que la cantidad de agua presente en la napa subterránea disminuirá si no se controla de manera adecuada. Esto conlleva a un rediseño de algunas partes del proceso, diferenciado en una mayor magnitud de reemplazo de agua, a través de la innovación de los sistemas hidráulicos que posee la máquina, el cual debe proporcionar un cambio en el sistema del intercambiador del aceite del cilindro Yankee y su motor reductor principalmente. No obstante, es necesario llevar a cabo las recomendaciones mencionadas para realizar el catastro final del uso y decidir los cambios a largo plazo que deben definirse para preservar la naturaleza de la napa subterránea.

7 Glosario

- Agua blanca: Es el agua extraída desde el proceso, directamente de los procesos de desgote mecánico ocurrido en la máquina papelera (Ver Sección 2.5.2.1 Desgote mecánico). Esta agua posee una gran cantidad de compuestos químicos incluyendo fibras propias de la pulpa y partículas finas, confiriendo la característica del color blanco. Los sólidos recolectados de esta agua se reconocen como lodos húmedos y son tratados en la planta de efluentes.
- Agua clarificada: Es el agua blanca que pasa por una etapa de clarificación, otorgando un grado de transparencia y de baja cantidad de partículas suspendidas al agua tratada, regularmente menor a 100 ppm. Esta agua posee variados usos en el proceso, como agua de regadera para algunos equipos y como línea de aseo.
- Agua industrial o fresca: Es el agua extraída desde las napas subterráneas naturales de la zona, cuya característica radica en su grado de pureza natural con carga mineral, baja turbidez y temperatura estable entre los 18°C y 23°C [32]. En la planta de Talagante, hay una planta de tratamiento del agua extraída desde las napas que se encarga de extraer partículas suspendidas a través de un proceso de osmosis inversa y de ablandar el agua para eliminar cargas iónicas.
- Agua superclarificada: Es el agua clarificada que pasa por una etapa de filtrado extra, entregando una calidad de agua con una concentración de partículas menor a 10 ppm. Esta agua es recirculada al proceso de la máquina, evitando generar un consumo excesivo de agua industrial.
- Atmos: Se refiere a la tecnología que confiere mayor capacidad de absorción y resistencia al papel fabricado, obtenida gracias a la configuración de la tela molde de la máquina, permitiendo almacenar una mayor cantidad de líquidos y ofrecer mejor resistencia que el papel convencional.
- Bypass: Desvío del flujo del proceso hacia otra zona.
- Clarificador DAF: Es un clarificador que utiliza la tecnología de la flotación por aire disuelto (Dissolved Air Flotation).
- Consistencia: Es una medida para calificar la concentración de fibras en una muestra. Esta medida se entrega en $\left[\frac{gr}{100 ml.}\right]$ y se expresa en porcentaje (%).
- Crescent Former: Se refiere a la tecnología que se debe configurar en la máquina papelera para producir papeles convencionales y económicos.
- Norma ANSI: Se refiere a las medidas relacionadas a los estándares impuestos por la ANSI. En específico, entrega información con respecto a los estándares relacionados a las características de las cañerías, tales como su diámetro interno, grosor, material, grado de resistencia, entre otros.
- Sistema de Control Distribuido (DCS): Es el sistema de control propio de cada máquina papelera o área de preparación pasta, donde los operarios tienen acceso a las variables del proceso correspondientes. Se basa en el uso de computadores donde se configuran los puntos estacionarios de proceso, manejo eléctrico de equipos o bien, para detectar problemas de funcionamiento de equipos varios.

8 Bibliografía

- [1] “Los dos mayores actores del papel tissue reconocen un cartel de más de 10 años”. [En línea]. Disponible en: <http://www2.latercera.com/noticia/los-dos-mayores-actores-del-papel-tissue-reconocen-un-cartel-de-mas-de-10-anos/>. [Accedido: 30-mar-2018].
- [2] “Empresas CMPC S.A. - Descripción General - Quiénes somos?” [En línea]. Disponible en: <http://ir.empresacmpc.cl/Spanish/Descripcin-General/Quines-somos/default.aspx>. [Accedido: 17-may-2018].
- [3] “CMPC - celulosa”. [En línea]. Disponible en: <https://www.cmpccelulosa.cl/CMPCCELULOSA/interior.aspx?cid=126&leng=es>. [Accedido: 29-mar-2018].
- [4] Gestipolis, “Desarrollo sostenible o sustentable, las 4 Rs de la sustentabilidad y la empresa - GestioPolis”, 2012. [En línea]. Disponible en: <https://www.gestipolis.com/desarrollo-sostenible-sustentable-las-4-r-sustentabilidad-y-la-empresa/>. [Accedido: 28-dic-2018].
- [5] Ministerio del Medio Ambiente, “Ley de fomento al reciclaje - MMA”. [En línea]. Disponible en: <http://portal.mma.gob.cl/residuos/ley-de-fomento-al-reciclaje/>. [Accedido: 28-dic-2018].
- [6] “Empresas CMPC S.A. - Sustentabilidad y Gbno. Corporativo - RS en CMPC”. [En línea]. Disponible en: <http://ir.empresacmpc.cl/Spanish/Sustentabilidad-y-Gbno-Corporativo/RS-en-CMPC/default.aspx>. [Accedido: 30-mar-2018].
- [7] “Inicio - Confort Papel Higiénico”. [En línea]. Disponible en: <http://www.confort.cl/>. [Accedido: 17-may-2018].
- [8] K. Teschke y P. Demers, “Industria del papel y de la pasta de papel. En: Sectores basados en recursos biológicos”, Washington, 1996.
- [9] MTR Martco, “Pulpers | MTR Martco: Paper Services & Industrial Services”. [En línea]. Disponible en: <http://www.mtrmartco.com/pulpers/>.
- [10] ALNICOLSA, “Hidrociclones”. [En línea]. Disponible en: <http://taninos.tripod.com/hidrociclon.htm>.
- [11] Cellwood Machinery, “KRIMA Dysperser Type KD” . .
- [12] Bruno Industrial, “Bruno Industrial - Refinadores - Refinador a Disco 4RA”. [En línea]. Disponible en: <http://www.bruno.com.br/es/produto/33/refinador-a-disco-4ra>. [Accedido: 19-dic-2018].
- [13] J. Gaona, “Química del papel”. Mérida, Venezuela, p. 191, 2000.
- [14] C. Valiente, “Modelamiento del proceso de secado de papel Tissue, caso real planta Talagante, CMPC”, Universidad de Chile, 2013.
- [15] tissuestory.com, “Crescent Former, or Conventional, Tissue Machine Technology | The Tissue Story”. [En línea]. Disponible en: <https://www.tissuestory.com/2017/09/09/crescent-former-or-conventional-tissue-machine-technology/>. [Accedido: 19-dic-2018].

- [16] J. Rebolledo, "OPTIMIZACIÓN DE TAREAS Y EQUIPOS EN LÍNEAS PRODUCTIVAS DURANTE UN CAMBIO DE FORMATO: IMPLEMENTACIÓN DE HERRAMIENTA SMED", Universidad de Chile, 2010.
- [17]: : "ACS Medio Ambiente:: Clarificadores DAF": [En línea]. Disponible en: <http://www.acsmedioambiente.com/clarificadordaf.html>. [Accedido: 19-dic-2018].
- [18] aguasresiduales.info, "Tratamiento de las aguas residuales en la industria papelera". [En línea]. Disponible en: <https://www.aguasresiduales.info/revista/blog/tratamiento-de-las-aguas-residuales-en-la-industria-papelera>. [Accedido: 25-ago-2018].
- [19] M. Bejarano y M. Escobar, "EFICIENCIA DEL USO DE MICROORGANISMOS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL", Universidad de La Salle, 2015.
- [20] Departamento de microbiología y genética, "Coliformes Totales: Filtración a través de membrana", *Universidad de Salamanca*. [En línea]. Disponible en: http://coli.usal.es/Web/demo_fundacua/demo2/FiltraMembColiT_auto.html.
- [21] IVAMI, "Bacterias productoras de H₂S - Cultivo cualitativo y cuantitativo; Identificación molecular - IVAMI". [En línea]. Disponible en: <https://www.ivami.com/es/microbiologia-de-alimentos/5444-bacterias-productoras-de-h2s-reductoras-de-sulfato-reductoras-de-sulfuro-reductoras-de-azufre-y-otras-moleculas-con-azufre-cultivo-cualitativo-y-cuantitativo-e-identificacion-molecular>.
- [22] N. Asrar *et al.*, "La Corrosión: La lucha más extensa", 2016.
- [23] microbiologia1, "MicroBichos: Sphaerotilus natans, un microorganismo asociado a contaminación", 2016. [En línea]. Disponible en: <http://microbiologia1uvg.blogspot.com/2016/10/sphaerotilus-natans-un-microorganismo.html>. [Accedido: 08-feb-2019].
- [24] LENNTECH.ES, "Crecimiento en exceso de microorganismos filamentosos". [En línea]. Disponible en: <https://www.lenntech.es/microorganismos-filamentosos.htm>. [Accedido: 08-feb-2019].
- [25] D. M. Gabriela Moeller Ana Cecilia Tomasini Ortíz, "MICROBIOLOGÍA DE LODOS ACTIVADOS".
- [26] A. Hernández-Pérez y J. I. Labbé, "Microalgas, cultivo y beneficios Microalgae, culture and benefits", vol. 49, pp. 157–173, 2014.
- [27] Ministerio Secretaría General de la Presidencia, "Decreto 90". 2012.
- [28] Tecno Equip, "REPORTE DE PRODUCTO: ¿Cuánto consume en agua tu torre de enfriamiento?", 2004. [En línea]. Disponible en: http://www.tecnoequip.com/boletines/7_Tecnoequip_com.pdf. [Accedido: 06-mar-2019].
- [29] SODIMAC, "0.9x3 m Malla 1/2" soldada galvanizada cuadros - Vector - 319805". [En línea]. Disponible en: <https://www.sodimac.cl/sodimac-cl/product/319805/0.9x3-m-Malla-1-2-soldada>

galvanizada-cuadros/319805. [Accedido: 20-mar-2019].

- [30] Torres de enfriamiento INSIN, "Precios de Torre de Enfriamiento :: Torres de enfriamiento INSIN", 2019. [En línea]. Disponible en: m.insin.mx/1488075_Precios-De-Torres-De-Enfriamiento.html. [Accedido: 06-mar-2019].
- [31] E. Durán, "Identificación y control de pitch en producto final de la línea de producción de pulpa de eucalipto", Universidad Federal de Vicosa, 2011.
- [32] Lenntech.es, "Propiedades de las aguas subterráneas". [En línea]. Disponible en: <https://www.lenntech.es/agua-subterranea/propiedades.htm>. [Accedido: 19-dic-2018].

9 Nomenclatura técnica

Existen algunos términos propios de la planta de CMPC Tissue Talagante para referirse a componentes técnicas del proceso, los cuales se detallan a continuación:

ANSI: American National Standards Institute – Instituto Nacional Estadounidense de Estándares.

BB: Bomba Centrífuga (Nomenclatura de la planta).

C.F.: Crescent Former.

DBO: Demanda Bioquímica de Oxígeno.

DCS: Distributed Control System - Sistema de Control Distribuido.

F_i : Flujo de fluido i.

HS: Válvula automática o manual (nomenclatura de la planta).

MP: Máquina Papelera.

PPA: Preparación pasta (zona).

SST: Sólidos Suspendidos Totales.

TAG: Nombre técnico que se le otorga a una variable del proceso.

VE: Torre de enfriamiento (Nomenclatura de la planta).

10 Anexos

Anexo A: Consumos de agua industrial en MP2

Para caracterizar los consumos de agua propios de la MP2, se nombran todas las conexiones existentes, clasificándose según la categoría de uso del agua, vigencia de conexión y ubicación del equipo en el proceso de la máquina:

Tabla 35: Conexiones de agua industrial existentes en la MP2, clasificadas según tipo de ingreso y ubicación.

Conexión	Categoría	Vigencia conexión	Ubicación en proceso
TQ336 – Agua super clarificada	Entrada – Make Up	Sí	Clarificación de aguas
TQ331 – Agua clarificada	Entrada – Make Up	Eventualmente	Clarificación de aguas
TQ345 – Agua para regaderas	Entrada – Make Up	Eventualmente	Clarificación de aguas
TQ320 – Agua blanca	Entrada – Make Up	Eventualmente	Clarificación de aguas
TQ346 – Agua industrial tibia	Entrada – Make Up	No	Clarificación de aguas
VE352 – Torre de enfriamiento	Entrada – Make Up	Eventualmente	Sistema de vacío
VE352 salida – Torre de enfriamiento	Entrada – Make Up	Eventualmente	Sistema de vacío
Regadera Polín Atmos	Entrada – Make Up	Sí	Máquina papelera
PU318 – Pulper de recortes	Entrada – Make Up	No	Máquina papelera
FA335 – Lavado de los filtros de arena	Entrada – Make Up	No	Clarificación de aguas
Regaderas Silo TQ-314	Entrada – Make Up	Sí	Circuito de aproximación
Despiche Silo TQ-314	Entrada – Make Up	No	Circuito de aproximación
BB314 – Bomba centrífuga	Sello Mecánico	Sí	Circuito de aproximación
BB322 – Bomba centrífuga	Sello Mecánico	Sí	Clarificación de aguas
BB323 – Bomba centrífuga	Sello Mecánico	No	Clarificación de aguas

BB351 – Bomba centrífuga	Sello Mecánico	Sí	Sistema de vacío
BB318 – Bomba centrífuga	Sello Mecánico	No	Máquina papelera
Bomba Condensado 2	Sello Mecánico	Sí	Sistema de vacío
Chilling Showers	Aditivos	Sí	Máquina papelera
TQ Lavado Nalco	Aditivos	Sí	Máquina papelera
TQ328 – Coagulante	Aditivos	No	Clarificación de aguas
TQ329 – Floculante	Aditivos	Sí	Clarificación de aguas
Reductor Yankee	Sistema Hidráulico	Sí	Máquina papelera
Enfriador de Aceite Yankee	Sistema Hidráulico	Sí	Máquina papelera
Calandra	Sistema Hidráulico	No	Máquina papelera
DuoCleaner	Sistema Hidráulico	Sí	Máquina papelera
Unidad Hidráulica Extractor Jumbos	Sistema Hidráulico	Eventualmente	Máquina papelera
Unidad Hidráulica Lubricación Polines	Sistema Hidráulico	Sí	Máquina papelera
Unidad Hidráulica Lubricación Central	Sistema Hidráulico	No	Máquina papelera
Sistema refrigeración – TDF 3D TRASAR	Sistema Hidráulico	Sí	Sistema de vacío
Agitadores de tanque (Varios)	Sistema Hidráulico	No	Circuito de aproximación
Data Scout Buckman – Medidor de SST	Otro	Sí	Clarificación de aguas

Definida la categoría del uso del agua y la vigencia de conexión, se decide la forma de medición de cada punto, siempre y cuando la conexión de agua se utilice de manera regular para validar el consumo total promedio. Las metodologías de medición se encuentran en la Sección 3.3 Metodologías para la estimación de flujos:

Tabla 36: Clasificación del agua del proceso de acuerdo a la categoría de conexión, vigencia y forma de medición.

Conexión	Categoría	Vigencia conexión	Forma de medición
TQ336 – Agua super clarificada	Entrada – Make Up	Sí	Cálculo en panel – Flujómetro ultrasonido

TQ331 – Agua clarificada	Entrada – Make Up	Eventualmente	Cálculo en panel
TQ345 – Agua para regaderas	Entrada – Make Up	Eventualmente	Cálculo en panel
TQ320 – Agua blanca	Entrada – Make Up	Eventualmente	Cálculo en panel
TQ346 – Agua industrial tibia	Entrada – Make Up	No	-
VE352 – Torre de enfriamiento	Entrada – Make Up	Eventualmente	Flujómetro ultrasonido
VE352 salida – Torre de enfriamiento	Entrada – Make Up	Eventualmente	Flujómetro ultrasonido
Regadera Polin Atmos	Entrada – Make Up	Sí	Flujómetro ultrasonido
PU318 – Pulper de recortes	Entrada – Make Up	No	-
FA335 – Lavado de los filtros de arena	Entrada – Make Up	No	-
Regaderas Silo TQ-314	Entrada – Make Up	Sí	Flujómetro ultrasonido
Despiche Silo TQ-314	Entrada – Make Up	Sí	Flujómetro ultrasonido
BB314 – Bomba centrífuga	Sello Mecánico	Sí	Flujómetro ultrasonido
BB322 – Bomba centrífuga	Sello Mecánico	Sí	Flujómetro ultrasonido
BB323 – Bomba centrífuga	Sello Mecánico	No	-
BB351 – Bomba centrífuga	Sello Mecánico	Sí	Flujómetro ultrasonido
BB318 – Bomba centrífuga	Sello Mecánico	No	-
Bomba Condensado 2	Sello Mecánico	Sí	Medición con balde
Chilling Showers	Aditivos	Sí	Flujómetro instalado
TQ Lavado Nalco	Aditivos	Sí	Estimación por periodo
TQ328 – Coagulante	Aditivos	No	Flujómetro ultrasonido
TQ329 – Floculante	Aditivos	Sí	-
Reductor Yankee	Sistema Hidráulico	Sí	Flujómetro ultrasonido
Enfriador de Aceite Yankee	Sistema Hidráulico	Sí	Flujómetro ultrasonido

Calandra	Sistema Hidráulico	No	-
DuoCleaner – Limpiador de tela	Sistema Hidráulico	Sí	Flujómetro ultrasonido
Unidad Hidráulica Extractor Jumbos	Sistema Hidráulico	Eventualmente	No estimable
Unidad Hidráulica Lubricación Polines	Sistema Hidráulico	Sí	Flujómetro ultrasonido
Unidad Hidráulica Lubricación Central	Sistema Hidráulico	No	-
Sistema refrigeración – TDF 3D TRASAR	Sistema Hidráulico	Sí	Medición con balde
Agitadores de tanque (Varios)	Sistema Hidráulico	No	-
Data Scout Buckman – Medidor de SST	Otro	Sí	Medición con balde

Finalmente, a cada punto de conexión de agua industrial se le midió el flujo de consumo respectivo, jerarquizado de mayor a menor consumo en configuración Crescent Former y Atmos, representado por la siguiente tabla:

Tabla 37: Consumos de agua industrial en cada conexión vigente en el proceso de la MP2, ordenado de mayor a menor para Atmos.

Conexión	Categoría	Ubicación en proceso	Flujo medido en [L/min] en Crescent	Flujo medido en [L/min] en Atmos
TQ336 – Agua Super Clarificada	Entrada - Make Up	Clarificación de aguas	450,00	552,50
Enfriador de Aceite Yankee	Sistema Hidráulico	Máquina papelera	119,50	113,50
Despiche Silo TQ-314	Entrada – Make Up	Circuito de aproximación	95,50	95,50
Reductor Yankee	Sistema Hidráulico	Máquina papelera	57,20	57,60
BB314 – Bomba Centrífuga	Sello Mecánico	Circuito de aproximación	49,60	49,60
Calandra	Sistema Hidráulico	Máquina papelera	37,20	37,20
BB351 – Bomba Centrífuga	Sello Mecánico	Sistema de vacío - Máquina papelera	26,10	26,10
Regadera Silo TQ-314	Entrada – Make Up	Circuito de aproximación	20,30	20,30

TDF 3D TRASAR	Sistema Hidráulico	Sistema de vacío - Máquina papelera	17,67	17,67
Regadera polín Atmos	Entrada - Make Up	Máquina papelera	0,00	13,00
BB322 – Bomba Centrífuga	Sello Mecánico	Clarificación de aguas	12,20	12,20
Data Scout Buckman	Otro	Clarificación de aguas	7,37	7,37
Chilling Showers	Aditivos	Máquina papelera	7,37	7,37
Bomba Condensado 2	Sello Mecánico	Sistema de vacío - Máquina papelera	4,95	4,95
Unidad Hidráulica Lubricación Polines	Sistema Hidráulico	Máquina papelera	3,20	3,20
TQ329 – Floculante	Aditivos	Clarificación de aguas	1,30	1,30
TQ Lavado en línea NALCO	Aditivos	Máquina papelera	0,47	0,47
VE352 – Torre de enfriamiento	Entrada - Make Up	Sistema de vacío - Máquina papelera	0,00	0,00
VE352 salida – Torre de enfriamiento	Entrada - Make Up	Sistema de vacío - Máquina papelera	0,00	0,00
BB323 – Bomba Centrífuga	Sello Mecánico	Clarificación de aguas	0,00	0,00
DuoCleaner – Limpiador de tela	Sistema Hidráulico	Máquina papelera	0,00	0,00
TQ331 – Tanque de agua clarificada	Entrada - Make Up	Clarificación de aguas	0,00	0,00
TQ320 – Tanque de agua blanca	Entrada - Make Up	Clarificación de aguas	0,00	0,00
TQ345 – Agua para regaderas	Entrada - Make Up	Clarificación de aguas	0,00	0,00
TQ328 – Coagulante	Aditivos	Clarificación de aguas	0,00	0,00
Lavado Filtros de arena	Entrada – Make Up	Clarificación de aguas	0,00	0,00
Total	-	-	909,93	1019,83

Anexo B: Producción diaria de papel

Para obtener de manera más exacta los consumos específicos de agua, es necesario establecer un valor promedio de la producción diaria de papel, en toneladas. Para ello, se determinó la producción total en el periodo de estudio, considerando el inicio el 1 de Octubre del 2018 y el término el 24 de Febrero del 2019.

Tabla 38: Producción promedio diaria de papel, para cada máquina papelera.

Máquina Papelera	Producción total [ton]	Días operativos [día]	Producción diaria promedio [ton/día]
MP1	10299,05	146	70,54
MP2 – Crescent Former	5688,16	77	73,87
MP2 – Atmos	2324,56	68	34,18
MP3	18003,08	134	134,35

Anexo C: Consumos específicos promedio

Con la información de los flujos de agua promedio utilizados por máquina y la producción promedio diaria, se pueden establecer valores para el consumo de agua específico de cada máquina al inicio del estudio.

Tabla 39: Consumo específico estimado para cada máquina papelera, al inicio del estudio.

Máquina Papelera	Consumo de agua [L/min]	Consumo de agua [m ³ /día]	Producción promedio diaria [ton/día]	Consumo específico [m ³ /ton]
MP1	2200	3168	70,54	44,91
MP2 - Crescent Former	909,93	1310,3	73,87	17,74
MP2 - Atmos	1019,83	1468,56	34,18	42,96
MP3	2100	3024	134,35	22,51
Promedio por máquina	-	-	-	32,03

Por otro lado, se presenta el consumo promedio por máquina cuando la MP2 tiene la configuración de Crescent Former y Atmos respectivamente, considerando lo usado en la MP1 y MP3:

Tabla 40: Consumo específico promedio entre las 3 máquinas paperas operativas.

Máquinas operativas	Consumo específico promedio [m ³ /ton]
MP1 – MP2 (C.F.) – MP3	28,38
MP1 – MP2 (Atmos) – MP3	36,79
Total	32,03

Finalmente, el consumo promedio por máquina cuando hay configuración Crescent Former y cuando hay configuración Atmos en la MP2 se obtiene promediando los consumos específicos dentro del periodo de estudio, cuyo valor aproximado es de 32 [m³/ton] por cada máquina. Este valor se asemeja al entregado por los informes de producción de la planta, cuyo valor se estima entre 30 y 34 [m³/ton], más cercano hacia los 32 [m³/ton].

Anexo D: Cálculo de flujo de agua normalizado

Existen consumos de agua en forma de Entrada al proceso – Make Up que se realiza de manera periódica, por lo que actualmente no existe un flujo continuo asociado. Sin embargo, el consumo puede ser normalizado para obtener un valor de gasto de agua continuo, sabiendo la periodicidad del llenado del tanque estudiado y sabiendo que la válvula que alimenta al tanque es automática, llenando el tanque desde un 40% de nivel hasta alcanzar el 80%.

Este cálculo fue realizado principalmente para el tanque de agua superclarificada (TQ-336), ya que tiene un ingreso de agua industrial periódico al no operar el filtro de arena. Además, hay que contabilizar el funcionamiento de una bomba asociada a este tanque, para tener una mayor exactitud en el cálculo del flujo pedido.

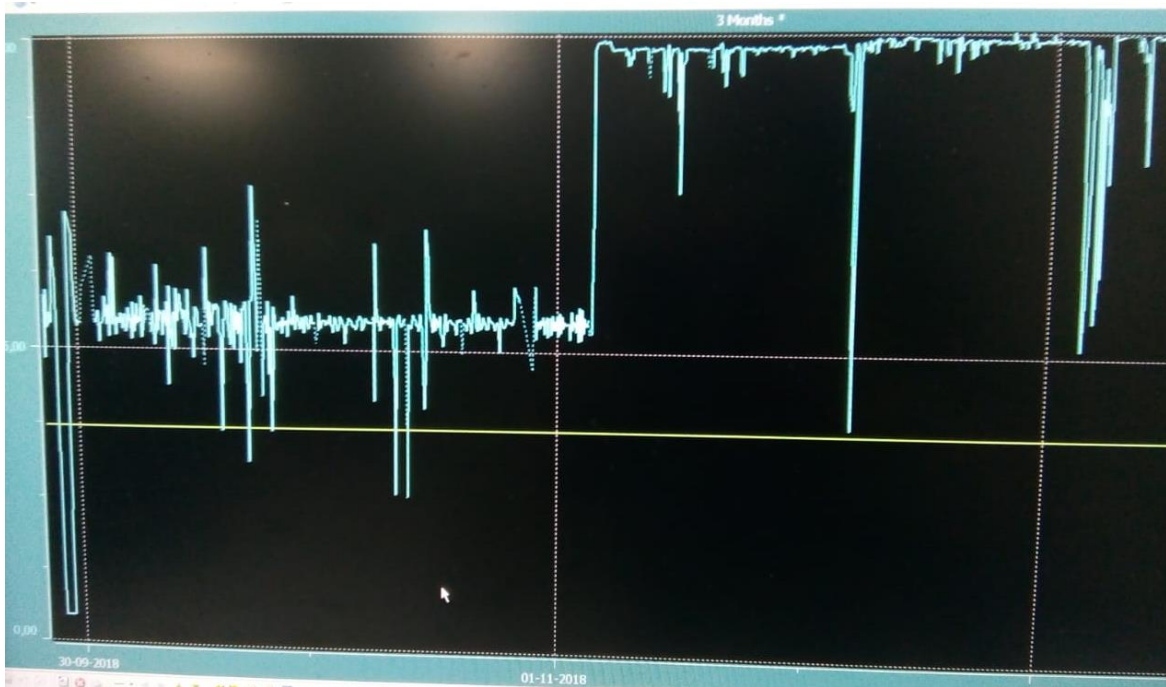


Figura 52: Pantalla del DCS de la MP2, mostrando la variación del nivel del tanque TQ-336.

Para realizar el cálculo del flujo, se necesitan los siguientes datos:

- Tanque estudiado: TQ-336 – Agua superclarificada.
- Volumen tanque: 35000 [L] al 110% de nivel ↔ 31818 [L] al 100% de nivel.
- Hora de inicio de apertura de válvula.
- Hora de término de ingreso de agua.
- Hora de nueva apertura de válvula.
- Flujo de bomba asociada al tanque: BB337 – 240 [L/min].
- Altura de nivel porcentual inicial (antes de la apertura).
- Altura de nivel porcentual final (después de la apertura).

Con esto, se calcula el volumen de agua ingresado por un periodo de tiempo determinado entre aperturas de válvulas, considerando el flujo descargado por la bomba asociada. A modo de ejemplo, se tiene la siguiente tabla de datos:

Tabla 41: Datos necesarios para el cálculo de flujo de agua normalizado.

Hora inicio apertura [s]	Hora termino apertura [s]	Hora nuevo inicio [s]	Periodo entre aperturas [s]	Altura inicio [%]	Altura término [%]
0	318	3554	3554	40,50%	79,51%

Para el llenado del tanque hay que considerar el volumen agregado por aumento de nivel y el volumen utilizado por la bomba durante el tiempo de apertura:

- Para el llenado del tanque, cada 3554 [s] se descarga un volumen de:

$$V_{tanque} = (79,51\% - 40,5\%) \cdot 31818 [L] = 12412,2 [L]$$

- Para el volumen utilizado por la bomba se calcula con el flujo levantado durante la apertura:

$$V_{bomba} = 240 \left[\frac{L}{min} \right] \cdot 318 [s] \cdot \frac{1 [min]}{60 [s]} = 1272 [L]$$

Se suman ambos volúmenes y se obtiene el volumen total de agua utilizado por un periodo de tiempo, cuyo flujo normalizado de manera continua será de:

$$V_{total} = (12412,2 + 1272) [L] = 13684,2 [L]$$

$$Flujo_{norm} = \frac{13684,2 [L]}{3554 [s]} \cdot \frac{60 [s]}{1 [min]} = 231,02 \left[\frac{L}{min} \right]$$

Estas mediciones se realizaron varios días seguidos en configuración Crescent Former y Atmos, cuyos valores resultan ser semejantes debido a que las bombas alimentan a las regaderas de alta presión de la máquina, utilizándose de la misma manera en ambas configuraciones. De acuerdo a las mediciones realizadas en un total de 15 días, el flujo de agua industrial normalizado promedio es de 239,45 [L/min].

Anexo E: Pantallas de control de agua industrial en máquina

A continuación, se presentan las pantallas diseñadas a integrarse en el sistema de control por cada máquina:

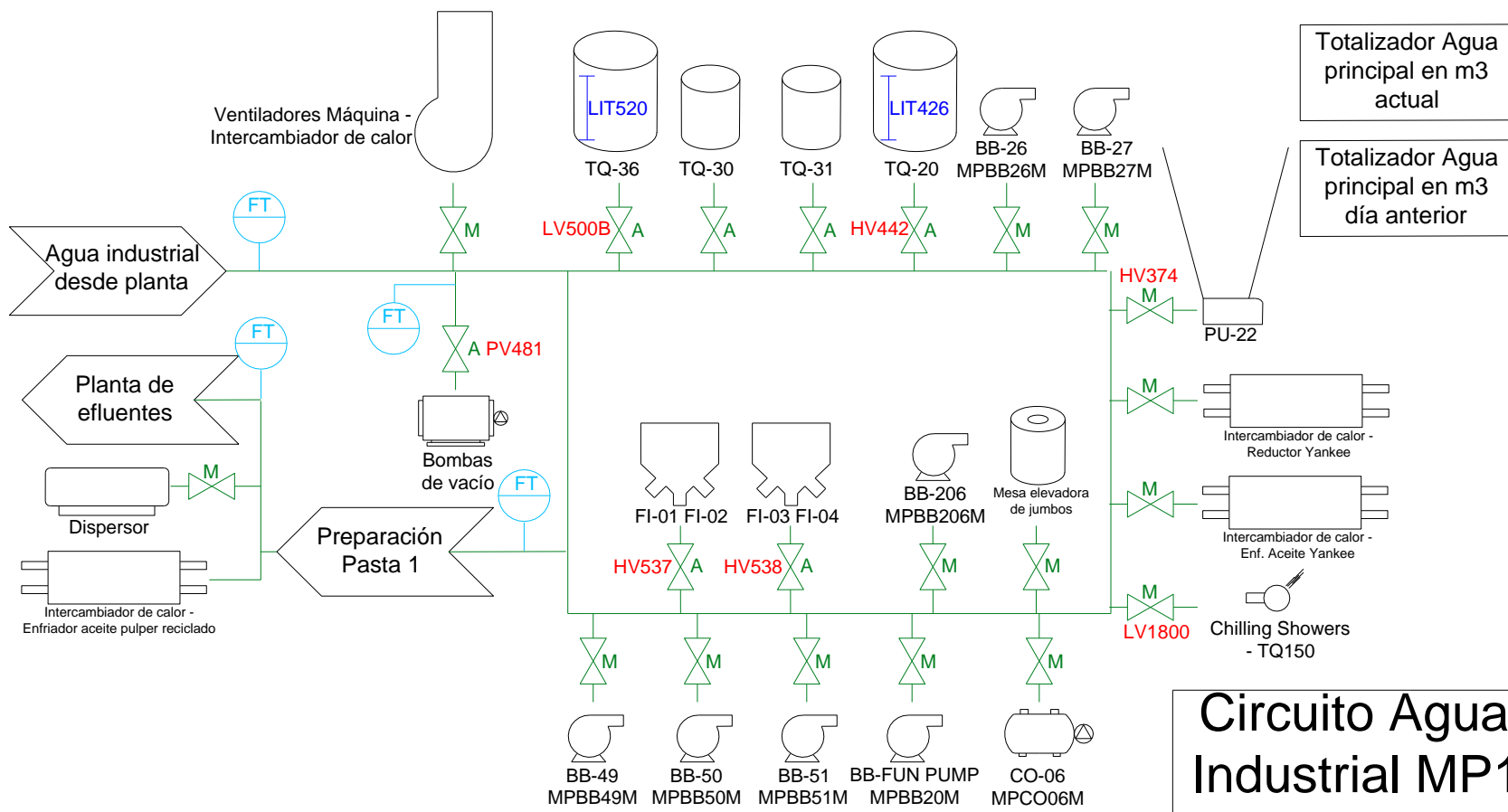


Figura 53: Diagrama de la red de agua industrial en la MP1. Incluye los equipos que pueden controlar su flujo de agua. M se refiere a válvula manual, mientras que A se refiere a válvula automática.

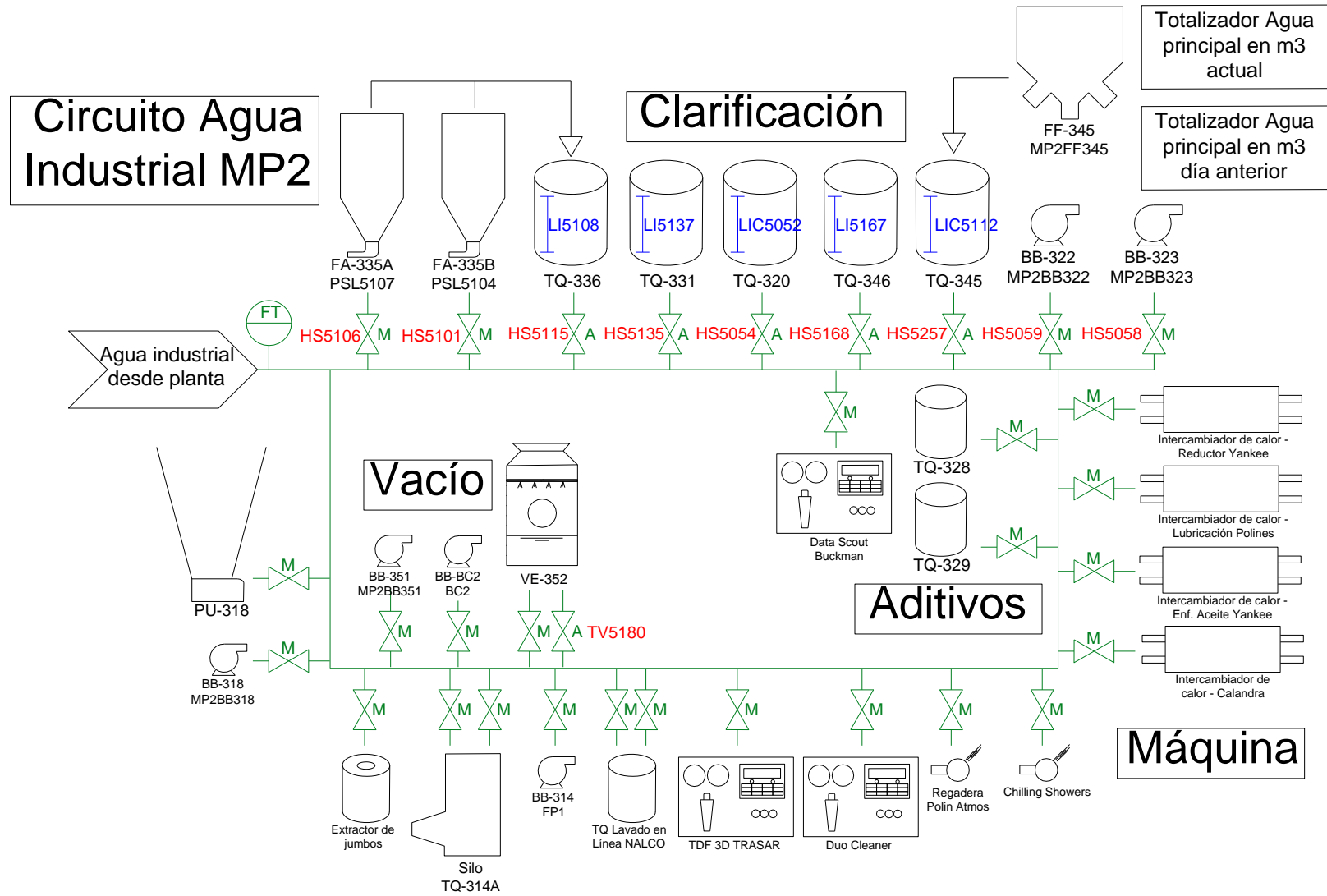


Figura 54: Diagrama de la red de agua industrial en la MP2. Incluye los equipos que pueden controlar su flujo de agua. M se refiere a válvula manual, mientras que A se refiere a válvula automática.

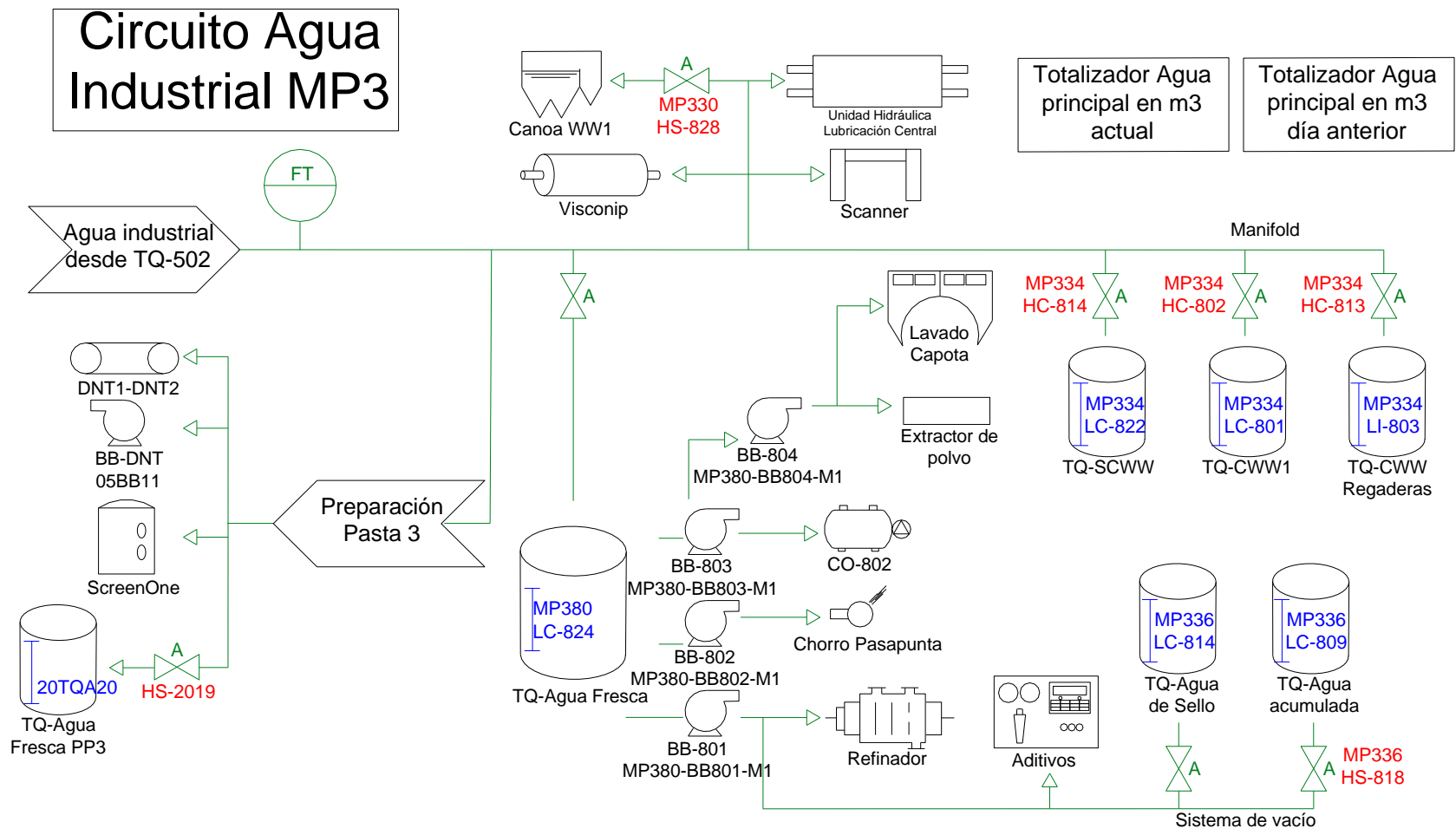


Figura 55: Diagrama de la red de agua industrial en la MP3. Incluye los equipos que pueden controlar su flujo de agua. M se refiere a válvula manual, mientras que A se refiere a válvula automática.

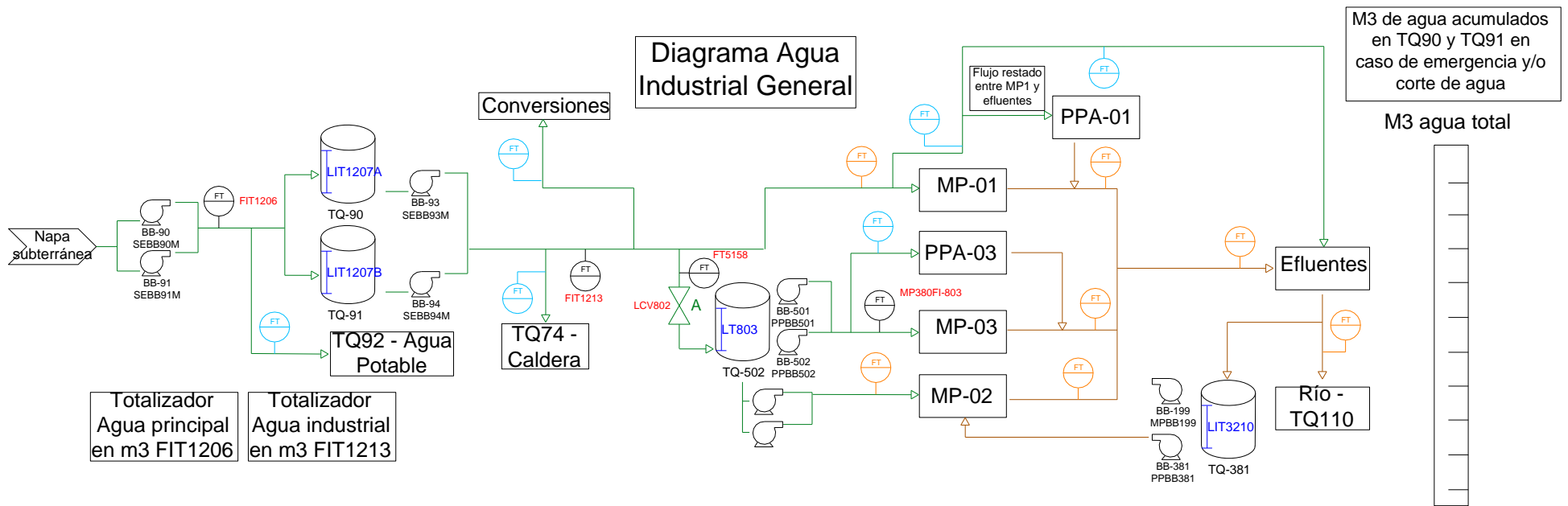


Figura 56: Diagrama de la red de agua general a implementarse en el panel de control. Incluye los flujómetros instalados y por instalar.

A continuación, se presentan los avances a la fecha de la implementación del diagrama de control en las máquinas, siendo exitosa para el caso general y para la MP3:

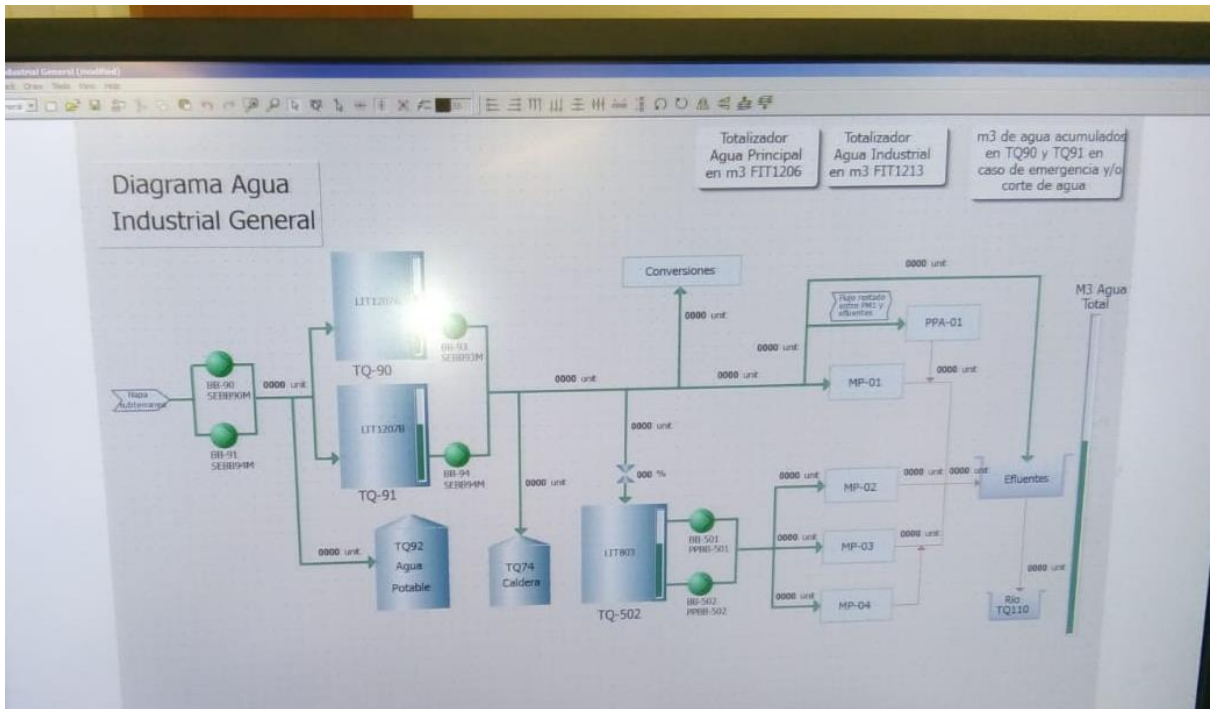


Figura 57: Imagen parcial de la implementación del diagrama del agua industrial general en las pantallas del DCS.



Figura 58: Imagen parcial de la implementación del diagrama de agua industrial en la MP1 en las pantallas del DCS.

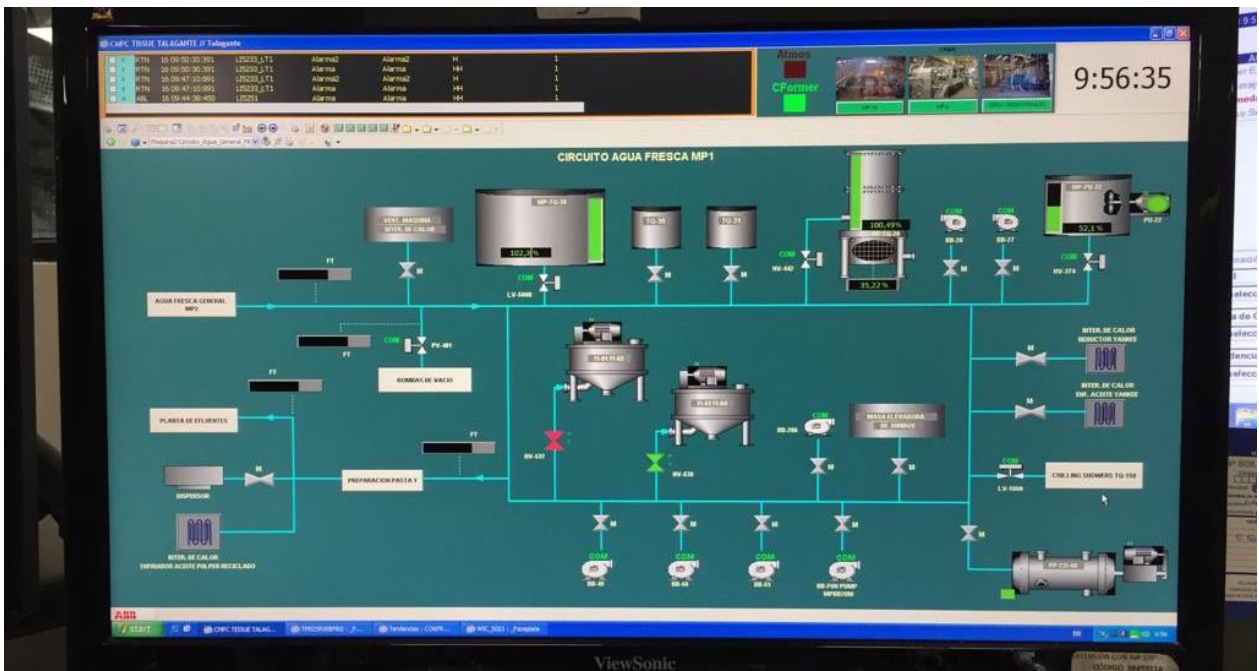


Figura 59: Imagen parcial de la implementación del diagrama de agua industrial en la MP2 en las pantallas del DCS.

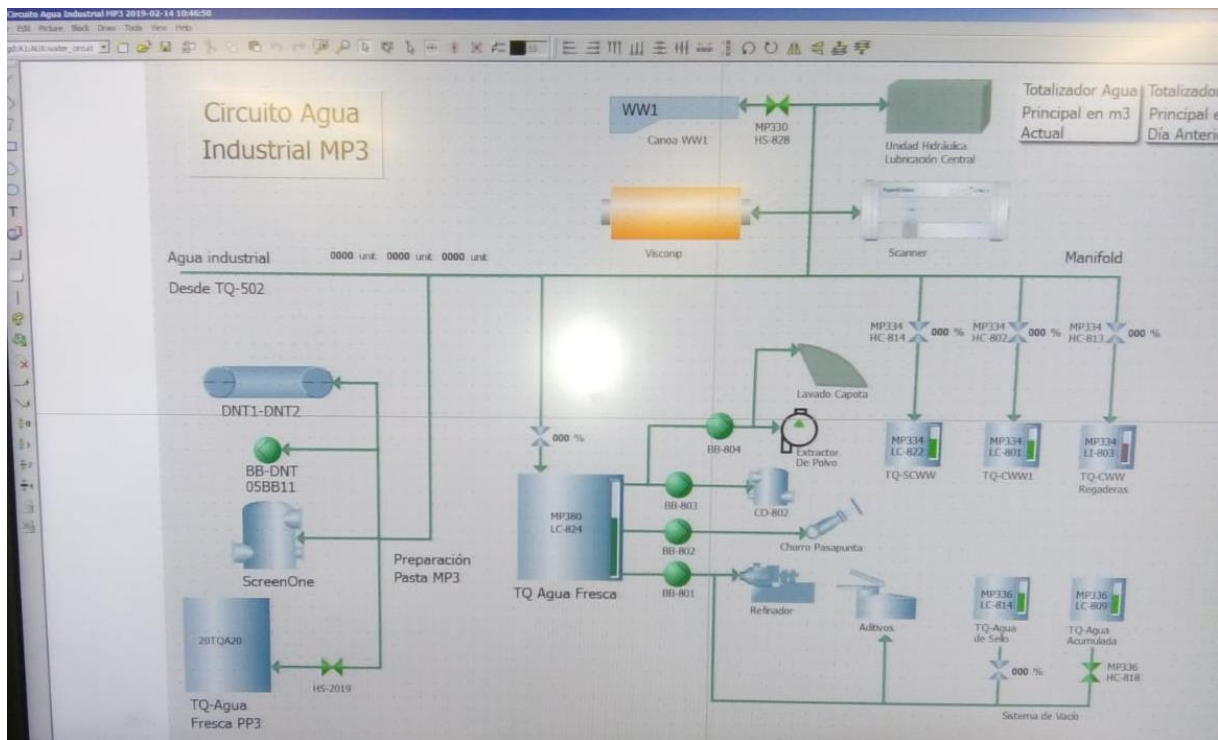


Figura 60: Imagen parcial de la implementación del diagrama del agua industrial en la MP3 en las pantallas del DCS.

Anexo F: Carta Gantt para programación de operación del espesador.

Tabla 42: Carta Gantt para operación del espesador EE-324.

Actividad	03/12	10/12- 17/12	24/12	31/12	07/01	14/01	21/01	28/01- 25/02	04/03
Revisión general del equipo (vista exterior)	XX								
Revisión de manómetros	XX								
Cotización de tapa de espesador de recortes			XX						
Revisión aire instrumentación de válvula 3 vías				XX					
Limpieza malla de discos					XX				
Solicitud de tapones de toberas (2)					XX				
Limpieza de despiche						XX			
Lubricación de reductores del EE-324							XX		
Cambio de aceite en reductores y engrase							XX		
Chequeo estático general							XX		
Cheque dinámico general							XX		
Pruebas en vacío							XX		
Pruebas con fluido							XX		
Instalación repuesto reductor regaderas									XX
Puesta en servicio definitivo									XX
Medición eficiencias (consistencia, fibra útil)									XX