



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

**EVALUACIÓN DE MEJORAS EN LA ELABORACIÓN DE PASTA DE PAPEL  
PARA LA DISMINUCIÓN DE PÉRDIDA DE FIBRA ÚTIL EN SOFTYS,  
PUENTE ALTO**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL QUÍMICA**

**ÁNGELA PAZ MEDINA CARRASCO**

PROFESOR GUÍA:  
FELIPE DÍAZ ALVARADO

INTEGRANTES DE LA COMISIÓN:  
LORENA ROJAS CONTRERAS  
FRANCISCO GRACIA CAROCA

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por:  
Softys S.A

SANTIAGO DE CHILE  
2024

## **EVALUACIÓN DE MEJORAS EN LA ELABORACIÓN DE PASTA DE PAPEL PARA LA DISMINUCIÓN DE PÉRDIDA DE FIBRA ÚTIL EN SOFTYS, PUENTE ALTO**

Softys, líder en papel tissue en Chile con un 72 % del mercado, busca reducir las pérdidas de fibra útil en su proceso productivo compuesto de cuatro macrofases: disgregación, depuración, dispersión y refinación; estas operaciones tienen rechazos de agua que contienen porcentaje de fibra útil, la cual es aprovechable por el proceso. Para resolver este problema se definieron los siguientes objetivos: crear escenarios a partir de condiciones de funcionamiento, estudiar el desempeño de estas condiciones, hacer una evaluación económica de cada escenario y comparar estas alternativas mediante análisis multicriterio.

El 67 % de la pérdida total de fibra útil está en la fase de dispersión compuesta por un Espesador, dos Tornillos estrujadores y una Prensa de Doble Tela. Se propusieron seis escenarios de mejora: Lazo Control en el Espesador, instalación de Cabezal cónico en los Tornillos, Variador de Frecuencia en ambos Tornillos, Sistemas de regaderas para la Prensa Doble Tela y dos alternativas que reemplazan equipos existentes por tecnología moderna; estos escenarios se examinaron con bibliografía interna y verificación con personal.

Los costos de implementación se obtuvieron mediante cotizaciones con proveedores y los beneficios mediante pruebas en terreno, obteniendo un flujo de caja para cada escenario y un cociente económico beneficio-costos. Además, se cuantificó el beneficio ambiental según el ahorro en emisiones de  $\text{kgCO}_2\text{eq}$  y se inspeccionó la mantenibilidad y operatividad de las alternativas, realizando un análisis multicriterio que definió la solución más beneficiosa según su puntaje en los ámbitos ya mencionados.

De los seis escenarios, se destaca la instalación de un cabezal cónico en el segundo Tornillo como la mejor opción, reduciendo las pérdidas en los Tornillos y en la Prensa en un 9 % y 81 % respectivamente, con la menor inversión inicial (67 % menos que la segunda alternativa de menor costo) y sin consumos adicionales de agua ni electricidad, generando un ahorro significativo de emisiones (18,7  $\text{tonCO}_2\text{eq/kUSD}$  de inversión); además de tener mantenibilidad sencilla y tener operatividad autónoma ya que no necesita intervención de operadores para su funcionamiento. Para implementar este escenario se debe adquirir el cabezal, instalarlo y luego hacer pruebas en terreno para determinar la altura óptima del cabezal tal que minimice la consistencia en el filtrado y maximice la de salida.

Si se deseara disminuir más la fibra útil en los rechazos de la fase de dispersión, se recomienda implementar los escenarios más beneficiosos siguientes según los resultados del análisis multicriterio, los cuales son de baja complejidad tanto de operación como de instalación, además de entregar un beneficio a corto plazo (menor a un año).

*Que nadie diga  
que no se podía.*

# Agradecimientos

Quiero comenzar agradeciendo a mis padres, quienes han creído en mí desde el principio y me han dado todo el apoyo que he necesitado. Sin ustedes no estaría donde estoy, y pasaré toda mi vida agradecida de todo lo que han hecho por mí. Por su amor incondicional, sus palabras de afirmación y su compañía durante toda mi carrera, gracias. No hay palabras para describir lo mucho que los amo.

Quiero agradecerle a Lorena, muchas gracias por darme la orientación que necesitaba cuando me sentía abrumada por el proceso, y por hacerte el tiempo de ayudarme, apoyarme y escucharme; has sido un pilar fundamental en el trabajo y no lo habría logrado sin tu apoyo.

También quiero darle las gracias a José Illesca, quien me enseñó pacientemente del proceso de la Planta y siempre tuvo disposición para revisar mis resultados y aconsejarme de mejoras que podría hacer; es seguro que me habría estancado sin su ayuda. Por su buena actitud, su disposición a ayudarme y sus consejos, gracias.

Del mismo modo extiendo mi agradecimiento al personal de Softys. A los operadores que me ayudaron a ejecutar mis ideas, al personal de electrocontrol que resolvió mis dudas técnicas, a mantención que me ayudó con una de mis pruebas, y sobre todo, a mi equipo de fabricación, quienes me alegraron mis días y me ayudaron cuando los necesitaba. Muchísimas gracias.

A Felipe Díaz, quien a pesar de sus acotadas ventanas de tiempo respondió mis dudas y me ayudó con la redacción y presentación de información de mi trabajo, gracias por haberme ayudado a que este trabajo fuese posible.

Le agradezco también a mi grupo de amigos de la Universidad, que le dieron color a los días grises y espantaron la nube de lluvia que a veces no parecía abandonarme. Por todos esos almuerzos, esas llamadas de Discord y sobre todo las salidas de descanso en semanas de receso que me hicieron sentir que la felicidad colmaba mi cuerpo, muchas gracias. A todos ustedes, gracias por el apañe, por haberme convencido de seguir, por reforzarme cuando lo necesitaba, por haberme enseñado que sí existe el sentirse en el lugar correcto, estos años a su lado se han sentido como un regalo divino. Los adoro, espero que su futuro sea más brillante que las estrellas y poder seguir acompañándolos en todo lo que la vida nos traiga.

# Nomenclatura

## Abreviaciones

Abreviación	Descripción
A	Área.
B	Beneficio.
%c	Porcentaje de consistencia.
E	Emisiones.
f	Factor de emisión.
F	Flujo volumétrico.
D	Diámetro.
kUSD	Miles de dólares.
L	Largo.
M	Flujo másico.
N	Número de aspas.
rpm	Revoluciones por minuto.
S	Inclinación en grados de un tambor aglomerador.
t	Tiempo.
TIR	Tasa de retorno interno.
USD	Dólares.
v	Velocidad lineal.
VAN	Valor Actual Neto.
VDF	Variador de frecuencia.

# Definiciones

<b>Término</b>	<b>Definición</b>
Bypass	Ruta alternativa a un equipo cuando no está en funcionamiento.
Byproduct	Producto que se puede obtener a partir de residuos de operaciones unitarias.
Centerline	Herramienta que permite definir el rango de trabajo de una variable para que el proceso funcione de forma óptima.
Consistencia	Kilogramos de fibra por cada 100 Litros de flujo, se expresa en %.
Fibra útil	Filamentos de largo entre 74 y 2000 micrómetros que pueden ser aprovechados por el proceso.
Filtrado	Flujo de salida de un equipo compuesto mayoritariamente de agua obtenido a partir de una operación mecánica.
Finos	Compuestos menores a 74 micrómetros de largo, abarcando también polvo, cenizas, arena, etcétera.
Franjeo	Aparición de franjas en tela de filtrado por limpieza errónea o insuficiente.
Jumbo	Rollo de papel tissue de dos metros de diámetro que es posteriormente convertido en productos finales.
Lodo	Sólido obtenido del tratamiento de agua, compuesto de desechos que no se pueden reincorporar al proceso y se llevan a relleno sanitario.
Nip	Punto de presión entre dos rodillos sólidos.
PID	Tipo de controlador con alta precisión utilizado para mantener una variable en un valor específico según cambios que realice al sistema.
Piping	Sistema de cañerías y tuberías.
Ratio	Cuociente o razón.
RILes	Residuos Industriales Líquidos.
Tissue	Tipo de papel caracterizado por su suavidad y fragilidad de fibras.
yield	Rendimiento.

## Sub índices

Sub-índice	Asociado a/Relacionado con
aditivos	Aditivos químicos.
ahorrados	Ahorro de fibra.
ambiental	Beneficios ambientales.
antes	Condiciones anteriores a la implementación de un escenario.
celulosa	Fibra que se obtiene de la celulosa.
después	Condiciones posteriores a la implementación de un escenario.
económico	Costos y beneficios monetarios.
electricidad	Corriente eléctrica.
fibra	Fibra total (reciclado y celulosa).
in	Entrada.
llenado	Variación de volumen positiva en un tanque.
lodos	Lodos producidos.
materia	Especies de estudio.
máx	Máximo.
mín	Mínimo.
muestra	Ejemplar de un punto de medición.
nominal	Corriente de diseño de un equipo.
op	Operación.
out	Salida.
pérdidas	Pérdidas del proceso.
prim.	Primario.
prom	Promedio.
reciclado	Fibra obtenida de papel reciclado.
res	Tiempo de residencia.
sec.	Secundario.
tanque	Tanque de almacenamiento.
ton,fibra	Tonelada de fibra.
total	Agua y fibra en la mezcla.
tor	Asociado a los Tornillos de estruje.
uso	Utilización de algo.
w	Agua.

## Símbolos

Símbolo	Definición
$\alpha$	Grados de reposo del mineral.
°	Grados.
%	Porcentaje.
$\rho$	Densidad.
$\omega$	Velocidad de giro.

## Unidades

Unidad	Definición
A	Ampere.
año	Año.
bar	Bar de Presión.
cm <sup>3</sup>	Centímetros cúbicos.
°C	Grados Celsius.
gr	Gramos.
hr	Hora.
kg	Kilogramo.
kgCO <sub>2</sub> eq	Kilogramo de CO <sub>2</sub> equivalente.
kUSD	Miles de dólares.
L	Litro.
m	Metro.
m <sup>3</sup>	Metro cúbico.
min	Minuto.
mL	Mililitros.
mm	Milímetros.
MWh	Mega Watt por hora.
rpm	Revoluciones por minuto.
s	Segundos.
USD/ton	Dólares por tonelada.

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Contextualización . . . . .	1
1.2. Caso de trabajo: Softys . . . . .	3
1.3. Objetivos . . . . .	4
<b>2. Estado del Arte</b>	<b>5</b>
<b>3. Antecedentes</b>	<b>8</b>
3.1. Detalle del proceso . . . . .	8
3.2. Caracterización de flujos másicos . . . . .	12
<b>4. Definición de escenarios</b>	<b>19</b>
4.1. Metodología . . . . .	19
4.2. Resultados . . . . .	20
4.2.1. Escenarios obtenidos . . . . .	28
4.3. Discusiones parciales . . . . .	29
4.4. Conclusiones parciales . . . . .	30
<b>5. Desempeño de escenarios</b>	<b>31</b>
5.1. Metodología . . . . .	32
5.2. Resultados . . . . .	32
5.2.1. Mejoras para el Espesador de Papel Viejo . . . . .	32
5.2.2. Mejoras para los Tornillos Estrujadores . . . . .	38
5.2.3. Mejoras para la Prensa Doble Tela . . . . .	41
5.2.4. Cambio a tecnología moderna . . . . .	42
5.3. Ahorro de fibra por alternativas . . . . .	42
5.4. Discusiones parciales . . . . .	42
5.5. Conclusiones parciales . . . . .	45
<b>6. Análisis económico</b>	<b>47</b>
6.1. Metodología . . . . .	47
6.2. Resultados . . . . .	49
6.2.1. Mejoras para el Espesador de Papel Viejo . . . . .	49
6.2.2. Mejoras para los Tornillos Estrujadores . . . . .	49
6.2.3. Mejoras para la Prensa Doble Tela . . . . .	51
6.2.4. Cambio a tecnología moderna . . . . .	52
6.2.4.1. Washer . . . . .	52
6.2.4.2. ScrewPress . . . . .	52

6.2.4.3. ScrewPress con cabezal en Tornillo . . . . .	53
6.2.5. Asignaciones porcentuales . . . . .	54
6.2.6. VAN . . . . .	54
6.3. Discusiones parciales . . . . .	55
6.4. Conclusiones parciales . . . . .	56
<b>7. Comparación</b>	<b>58</b>
7.1. Metodología . . . . .	58
7.2. Resultados . . . . .	59
7.2.1. Ratio económico . . . . .	59
7.2.2. Mantenibilidad . . . . .	60
7.2.3. Operatividad . . . . .	61
7.2.4. Efecto medioambiental . . . . .	63
7.2.5. Análisis Multicriterio . . . . .	64
7.2.5.1. Análisis de Sensibilidad . . . . .	65
7.3. Discusiones parciales . . . . .	68
7.4. Conclusiones parciales . . . . .	70
<b>8. Discusiones generales</b>	<b>71</b>
<b>9. Conclusiones generales</b>	<b>73</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>76</b>
<b>Anexos</b>	<b>80</b>
A. Metodología de medición flujo másico de fibra útil . . . . .	80
B. Memoria de cálculo: Rango de flujos del Espesador . . . . .	83
C. Memoria de cálculo: Densidad del flujo de entrada al Espesador . . . . .	84
D. Mediciones de la velocidad de los Tornillos . . . . .	85
E. Desarrollo de la prueba de velocidad del Espesador . . . . .	88
F. Desarrollo de la prueba de cabezal de los Tornillos . . . . .	97
G. Memoria de cálculo: Factor de emisión de residuos de pasta . . . . .	111
H. Memoria de cálculo: Factor de emisión de consumo de agua . . . . .	112
I. Memoria de cálculo: Ratio ambiental . . . . .	113

# Índice de Tablas

5.1.	Densidad del flujo de entrada del Espesador en rango de condiciones de trabajo.	32
5.2.	Resultados de la Prueba de velocidad en Espesador según cálculos teóricos. . .	37
5.3.	Resultados de la Prueba de velocidad en Espesador según cálculos en terreno.	38
5.4.	Resultados de la Prueba de Cabezal en Tornillos estrujadores. . . . .	39
5.5.	Valores de corriente en Tornillos cuando se está fabricando una receta más densa.	40
5.6.	Densidad del flujo de entrada en $gr/cm^3$ para el rango de condiciones de trabajo para los Tornillos. . . . .	40
5.7.	Análisis de sensibilidad de consistencia de filtrado de Tornillos según variaciones en la abertura de la válvula de caudal. . . . .	41
5.8.	Análisis de sensibilidad de consistencia de filtrado de Tornillos según variaciones en el grado de cerrado de la válvula de caudal. . . . .	41
5.9.	Porcentaje de ahorro de fibra en los rechazos de cada equipo según el desempeño de cada escenario. . . . .	42
6.1.	Asignaciones porcentuales de costos directos del CAPEX para el Lazo control del Espesador. . . . .	49
6.2.	Asignaciones porcentuales de costos indirectos del CAPEX para el Lazo control del Espesador. . . . .	49
6.3.	Costos variables considerados en el OPEX para el escenario de Lazo de control en el Espesador. . . . .	49
6.4.	Asignaciones porcentuales de costos directos del CAPEX para el Cabezal cónico de los Tornillos. . . . .	50
6.5.	Asignaciones porcentuales de costos indirectos del CAPEX para el Cabezal cónico de los Tornillos. . . . .	50
6.6.	Costos variables considerados en el OPEX para el escenario de Cabezales cónicos de los Tornillos. . . . .	50
6.7.	Asignaciones porcentuales de costos directos del CAPEX para el Variador de Frecuencia en los Tornillos. . . . .	50
6.8.	Asignaciones porcentuales de costos indirectos del CAPEX para el Variador de Frecuencia en los Tornillos. . . . .	50
6.9.	Costos variables considerados en el OPEX para el Variador de Frecuencia en los Tornillos. . . . .	51
6.10.	Asignaciones porcentuales de costos directos del CAPEX para las regaderas de la Prensa. . . . .	51
6.11.	Asignaciones porcentuales de costos indirectos del CAPEX para las regaderas de la Prensa. . . . .	51
6.12.	Costos variables considerados en el OPEX para las regaderas de la Prensa. . .	51
6.13.	Asignaciones porcentuales de costos directos del CAPEX para la adquisición del Washer. . . . .	52

6.14.	Asignaciones porcentuales de costos indirectos del CAPEX para la adquisición del Washer. . . . .	52
6.15.	Costos variables considerados en el OPEX para la adquisición del Washer. . .	52
6.16.	Asignaciones porcentuales de costos directos del CAPEX para la adquisición de la ScrewPress. . . . .	53
6.17.	Asignaciones porcentuales de costos indirectos del CAPEX para la adquisición de la ScrewPress. . . . .	53
6.18.	Costos variables considerados en el OPEX para la adquisición de la ScrewPress.	53
6.19.	Variación de parámetros de trabajo en Prensa Doble Tela antes y después de la implementación del cabezal en el Tornillo-50. . . . .	53
6.20.	Asignaciones porcentuales para el CAPEX para cada escenario considerando costos directos e indirectos. . . . .	54
6.21.	Comparación de Inversión inicial, VAN y TIR para cada escenario. . . . .	54
7.1.	Valor de ratio económico para cada escenario. . . . .	59
7.2.	Puntaje a cada escenario según su ratio económico en escala del 1–7. . . . .	60
7.3.	Puntaje a cada escenario según su facilidad de mantención en escala de 1–7. . .	61
7.4.	Puntaje a cada escenario según su facilidad de operación en escala de 1–7. . .	62
7.5.	Factores de emisión para las variables analizadas. . . . .	63
7.6.	Ratio ambiental que compara ahorro de emisiones versus el costo del escenario en miles de dólares. . . . .	63
7.7.	Ratio ambiental en puntaje del 1 al 7. . . . .	64
7.8.	Porcentaje de criterios para el análisis multicriterio. . . . .	64
7.9.	Análisis multicriterio con puntuaciones asignadas. . . . .	64
7.10.	Asignación porcentual de criterios cuando se le da prioridad al beneficio económico.	65
7.11.	Puntajes de cada escenario y su variación respecto a su posición original al priorizar el beneficio económico. . . . .	65
7.12.	Asignación porcentual de criterios cuando se le da prioridad a la mantenibilidad.	66
7.13.	Puntajes de cada escenario y su variación respecto a su posición original al priorizar la mantenibilidad. . . . .	66
7.14.	Asignación porcentual de criterios cuando se le da prioridad a la operatividad.	66
7.15.	Puntajes de cada escenario y su variación respecto a su posición original al priorizar la operatividad. . . . .	67
7.16.	Asignación porcentual de criterios cuando se le da prioridad equitativa a los criterios cualitativos. . . . .	67
7.17.	Puntajes de cada escenario y su variación respecto a su posición original al priorizar mantenibilidad y operatividad. . . . .	67
7.18.	Asignación porcentual de criterios cuando se le da prioridad al beneficio ambiental.	68
7.19.	Puntajes de cada escenario y su variación respecto a su posición original al priorizar el beneficio ambiental. . . . .	68
D.1.	Mediciones de velocidad de los Tornillos 50 y 51 . . . . .	87
E.1.	Vaciado del tanque de pasta de entrada en condiciones de operación habitual. .	89
E.2.	Llenado del tanque de aceptado en condiciones de operación habitual. . . . .	89
E.3.	Mediciones de flujo de llenado del tanque de aceptado según intervalos de llenado.	90
E.4.	Variación del nivel del tanque de pasta de entrada al cerrar y abrir la Bomba elevadora. . . . .	90
E.5.	Obtención de flujos de llenado y vaciado del tanque de pasta de entrada según diferencia en intervalos. . . . .	91

E.6.	Variación de volumen en el tanque de aceptado con disminución de consistencia.	91
E.7.	Obtención de flujos de llenado del tanque de aceptado según diferencia en intervalos. . . . .	92
E.8.	Mediciones de consistencias en el Espesador después de la prueba. . . . .	92
E.9.	Variación del nivel del tanque de pasta de entrada con el Espesador en 1.250 rpm.	93
E.10.	Flujos de llenado y vaciado del tanque de pasta de entrada cuando el Espesador se encuentra en 1.250 rpm. . . . .	93
E.11.	Llenado del tanque de aceptado con el Espesador en 1.250 rpm. . . . .	94
E.12.	Medición de flujo del tanque de aceptado según diferencias de intervalos cuando la velocidad del Espesador está en 1.250 rpm. . . . .	94
E.13.	Llenado del tanque de pasta de entrada con Espesador en velocidad de 1.500 rpm con manipulación de bomba elevadora. . . . .	94
E.14.	Diferencia de intervalos de llenado del tanque de pasta de entrada para cálculo de flujo con Espesador en 1.500 rpm. . . . .	95
E.15.	Llenado del tanque de aceptado cuando el Espesador trabaja a 1.500 rpm. . .	95
E.16.	Diferencia de intervalos de llenado del tanque de aceptado para cálculo de flujo.	95
E.17.	Resultados de la Prueba de velocidad en Espesador según cálculos teóricos. . .	96
E.18.	Resultados de la Prueba de velocidad en Espesador según cálculos en terreno.	96
F.1.	Medidas de consistencia de salida de los Tornillos el segundo día. . . . .	99
F.2.	Medidas de consistencia del filtrado de los Tornillos el segundo día. . . . .	99
F.3.	Medidas de consistencia a la salida de los Tornillos del tercer día. . . . .	100
F.4.	Medidas de consistencia del filtrado de los Tornillos del tercer día. . . . .	100
F.5.	Medidas de consistencia a la salida de los Tornillos del cuarto día. . . . .	101
F.6.	Medidas de consistencia del filtrado de los Tornillos el cuarto día. . . . .	101
F.7.	Medidas de consistencia del filtrado de la Prensa Doble Tela. . . . .	102
F.8.	Consistencias del filtrado de los Tornillos obtenidas por registro los últimos días de fabricación de la receta estudiada. . . . .	102
F.9.	Consistencias del filtrado de la Prensa Doble Tela obtenidas por registro los últimos días de fabricación de la receta de estudio. . . . .	103
F.10.	Valores de corriente en Tornillo 50 con el cabezal instalado. . . . .	105
F.11.	Medidas de nivel de tanque externo cuando las válvulas están en 8 centímetros.	105
F.12.	Medidas de nivel de tanque externo cuando las válvulas están en 7 centímetros.	105
F.13.	Flujo volumétrico del filtrado de los Tornillos con válvulas en 8 centímetros. .	106
F.14.	Flujo volumétrico del filtrado de los Tornillos con válvulas en 7 centímetros. .	106
F.15.	Flujos máxicos obtenidos a partir de mediciones con válvulas en 8 y en 7 centímetros. . . . .	107
F.16.	Diferencia de kilogramos útiles en filtrados obtenidos a partir de mediciones con válvulas en 8 y en 7 centímetros. . . . .	107
F.17.	Mediciones de nivel de tanque de almacenamiento. . . . .	108
F.18.	Flujo volumétrico de salida del Disperguer. . . . .	109
H.1.	Factores de emisión en el proceso tratamiento de agua potable según sus fases.	112

# Índice de Ilustraciones

1.1.	Diagrama de las macrofases de la elaboración de papel tissue. . . . .	3
3.1.	Diagrama de bloques de la fase de Disgregación. . . . .	9
3.2.	Sistema de coladores y despastilladores en Depuración. . . . .	10
3.3.	Diagrama de bloques de la fase de Dispersión . . . . .	11
3.4.	Diagrama de bloques de la fase de Refinación. . . . .	12
3.5.	Distribución porcentual de pérdidas de fibra útil según macrofases. . . . .	13
3.6.	Distribución de pérdida de fibra útil en la fase de dispersión según sus equipos. . . . .	14
3.7.	Diagrama de bloques de equipos que conforman la macrofase de dispersión. . . . .	14
3.8.	Diagrama de funcionamiento de Espesador de Papel Viejo. . . . .	15
3.9.	Diagrama de funcionamiento de Tornillos estrujadores. . . . .	16
3.10.	Diagrama de funcionamiento de la Prensa Doble Tela. . . . .	17
3.11.	Diagrama detallado del funcionamiento de la Prensa Doble Tela. . . . .	17
4.1.	Balance de masa a una lámina de pasta en el Espesador de Papel Viejo. . . . .	21
4.2.	Nivel de agua en una rotación del aspa de un Tornillo de Arquímedes. . . . .	24
4.3.	Franjeo en la tela al utilizar regaderas no oscilatorias. . . . .	26
4.4.	Ubicación de Regaderas en Prensa Doble Tela. . . . .	27
5.1.	Balance de masa en el Espesador. . . . .	33
5.2.	Balance de masa al Espesador ante disminución en la consistencia de entrada. . . . .	34
5.3.	Balance de masa al Espesador ante disminución en la consistencia de entrada y a 1.250 rpm. . . . .	35
5.4.	Diagrama de fase del entorno de la prueba en el Espesador. . . . .	36
A.1.	Ejemplo de porcentaje de finos en los resultados. . . . .	82
E.1.	Balance de masa del Espesador en su condición de trabajo inicial. . . . .	88
E.2.	Esquema del entorno de la prueba del Espesador. . . . .	88
E.3.	Tendencia de nivel del tanque de aceptado en celeste. . . . .	89
F.1.	Cabezal cónico del Tornillo 50 en uso. . . . .	97
F.2.	Tela de la Prensa limpia directamente bajo la caja de nivel. . . . .	98
F.3.	Distribución de uso de potencias del Disperguer. . . . .	103
F.4.	Distribución de consistencias en la Bomba de alta consistencia en un día. . . . .	104
F.5.	Distribución de consistencias en la Bomba de alta consistencia por la duración de la prueba. . . . .	104
F.6.	Balance de masa en Disperguer y Prensa Doble Tela. . . . .	107

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Contextualización

El papel es una estructura obtenida en base a fibras vegetales de celulosa, las que se entrecruzan formando una lámina resistente y flexible. Es posible obtener distintos tipos de papel según la proporción de las fibras vegetales de celulosa, fibra reciclada y productos químicos que le otorgarán propiedades distintivas, tales como distintos niveles de resistencia, durabilidad y blancura; lo que permite que el papel sea utilizado ampliamente tanto a nivel individual como industrial según la necesidad a satisfacer.

Dentro de los tipos de papel que se pueden obtener se destaca el papel kraft para empaque, el encerado para conservación de alimentos, el blanco para escritura y transmisión de información, el tissue para higiene, etcétera. En particular, el tissue es un tipo de papel más liviano y en algunos casos transparente, y puede estar compuesto de pulpa de papel reciclado y/o de celulosa, utilizando también químicos que le dan su blancura característica. De este papel se pueden obtener productos de uso diario como pañuelos desechables, papel higiénico y papel absorbente [1], y es el tipo de papel en que se va a enfocar el presente trabajo.

El papel tissue es altamente utilizado tanto a nivel doméstico como a nivel de empresa, esto ya que es más suave y delgado respecto al papel de impresión tradicional, además de que no permite la proliferación de bacterias al ser desechado inmediatamente después de su uso, reduciendo el contacto de bacterias y virus. De este papel se destacan dos productos derivados: las toallas desechables y el papel higiénico, esto ya que son los productos más presentes en espacios públicos y privados.

El secado de manos con papel tissue ofrece propiedades superiores de higiene cuando se compara con el secado eléctrico, incluso siendo preferido en lugares de altos estándares de sanidad como clínicas y hospitales. Estudios han revelado que en lugares donde se utiliza el método de secado eléctrico hay 6 veces más bacterias que en recintos donde hay únicamente secado mediante toallas de papel tissue; mientras que lugares donde se tiene secado por aire rápido hay 27 veces más bacterias respecto a lugares donde se prefieren las toallas desechables como método de secado [2]. Asimismo, las toallas de papel tissue son preferidas en la industria de restaurantes y catering ya que entregan una mejor limpieza y secado de superficies de contacto y utensilios de cocina que el uso de tela para esta misma tarea [3].

Debido a la contingencia sanitaria del 2020, hubo un incremento en consumo de productos de higiene personal como lo es el caso de papel higiénico y pañuelos de papel desechables, en que la Asociación Americana de Bosque y Papel (AF&PA por sus siglas en inglés), suplieron veintidós mil toneladas de papel tissue por día en Febrero y Marzo, cifra máxima desde el 2007, y para ello se utilizó el stock de reserva de las plantas de producción, las cuales han operado a máxima capacidad desde entonces [4]. Además, posterior a las medidas restrictivas del COVID, se proyecta un crecimiento del mercado de papel tissue en la región Asia-Pacífico debido al aumento de los ingresos disponibles, la mejora del nivel de vida, la rápida industrialización y la globalización en economías emergentes de papel tissue como China, Japón e India [5].

Al año 2020, Estados Unidos mantiene su posición como el país con mayor consumo de papel tissue en cuanto a volumen, teniendo un consumo de 27 kilogramos per cápita al año, con el subsector de papel higiénico siendo más significativo ya que es un elemento de necesidad básica en los hogares [5]. Este mismo país tiene también el título del mayor consumidor de toallas desechables de papel, ya que de los \$12 miles de millones de dólares que generó el mercado de este producto en el 2017, Estados Unidos aportó con \$5,7 miles de millones de dólares, casi un 50 %; y en 2020 se reportó un incremento a \$6,47 miles de millones de dólares [6].

Se estima que para el 2028 el mercado mundial del papel tissue alcanzará un valor de 98,5 miles de millones de kilos de producción, con un índice de crecimiento anual de mercado de 6,32 % [7]; en comparación, la industria farmacéutica tiene un índice de 5,8 % [8] y la de energía, un índice de 4,89 % [9] de crecimiento anual. El incremento en este mercado se atribuye al incremento en los estándares de vida, el aumento de la población y aumento de la renta familiar [7].

En el caso de Chile, se proyecta un crecimiento demográfico de un 15,3 % hacia el 2050 [10]. Este crecimiento tiene un impacto directo en la demanda de papel tissue que, como se mencionó antes, aumenta junto con el crecimiento de la población. Esto plantea desafíos y oportunidades para empresas como Softys, una destacada productora de papel tissue en América Latina.

## 1.2. Caso de trabajo: Softys

Softys es una empresa productora de papel tissue, con sedes en ocho países en América Latina: Argentina, Brasil, Colombia, Chile, Ecuador, México, Perú y Uruguay; y es la marca número uno de papel tissue en América Latina, teniendo un 21% de participación en el mercado. Tiene a su nombre marcas altamente presentes en el mercado Chileno como Elite, Nova y Confort, teniendo un 72% del negocio tissue; además de obtener ganancias de 146 millones de dólares al cierre del 2020 [11].

Para la obtención de sus productos es necesario el material semi-elaborado que es comúnmente llamado “Jumbo”, que será llevado a la etapa de conversión antes de ser papel higiénico o toalla absorbente, etapa que no será estudiada en el presente trabajo. El Jumbo es un rollo de papel tissue de dos metros de diámetro y su receta de fabricación varía según el producto final que se desea obtener; para efectos de este trabajo se estudiará la receta más fabricada en la empresa, que corresponde a una receta mixta (de fibra reciclada y celulósica) de bajo gramaje.

El proceso de producción del Jumbo puede dividirse en cuatro macroetapas principales que se presentan en la siguiente imagen:

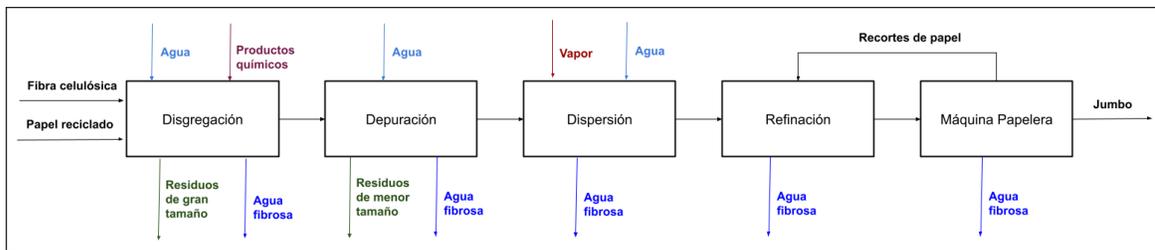


Figura 1.1: Diagrama de las macrofases de la elaboración del papel tissue. Elaboración propia.

Como es posible ver en el diagrama, en el proceso de elaboración de papel tissue existen salidas de agua fibrosa. Estos contienen finos, cenizas, astillas, suciedad de equipos y, lo más importante, fibra útil; definida como filamentos que tienen un largo entre 74 y 1200 micrómetros y su denominación de “útil” es debido a que pudo haber sido aprovechada por el proceso.

La pérdida de fibra útil implica un costo para la empresa no sólo en términos de tratamiento de efluentes, sino que también representa una pérdida de utilidades al tener un costo de oportunidad asociado, es decir, una ganancia que se podría tener si se vendiera la fibra perdida en los rechazos. Esta ineficiencia en la gestión de la fibra se traduce en una necesidad de procesar más materia prima en la entrada para obtener la misma cantidad de papel, lo que a su vez afecta la rentabilidad del proceso.

Esta problemática subraya la importancia de abordar de manera efectiva la gestión de la fibra útil en la planta de papel tissue. En este contexto, el trabajo de título tiene como objetivo principal evaluar mejoras en los equipos de la línea de preparación de pasta de papel, con el fin de minimizar las pérdidas de fibra útil en la planta de Softys en Puente Alto.

### 1.3. Objetivos

El objetivo general del trabajo de título, como se mencionó anteriormente, corresponde a evaluar mejoras en equipos en la línea de preparación pasta de papel para la disminución de pérdida de fibra útil en la planta de papel tissue de Softys en Puente Alto.

Para su cumplimiento se proponen los siguientes objetivos específicos:

1. Crear escenarios de trabajo a partir de condiciones estándar de funcionamiento, considerando caudales, rangos de variables y requisitos de trabajo para la correcta operación de los equipos existentes según necesidades de producción, corroborando su plausibilidad con la bibliografía interna y con proveedores frecuentes de la empresa.
2. Estudiar el desempeño de condiciones estándar mediante pruebas físicas en terreno o justificación teórica y obtener cotizaciones iniciales de los escenarios propuestos para definir los costos de su implementación.
3. Evaluar las alternativas mediante un análisis económico que considere costos fijos, costos variables y utilidades de su implementación según lo obtenido por desempeño de pruebas e inspección bibliográfica.
4. Comparar los escenarios de trabajo mediante un análisis multicriterio, considerando un cociente beneficio-costos económico, la mantenibilidad del escenario, la operatividad y los efectos en el medio ambiente mediante un cociente de ahorro de emisiones-costos económico.

Estos objetivos están diseñados para abordar de manera integral la problemática de la pérdida de fibra útil, asegurando una gestión más eficiente y sostenible en la planta de papel tissue.

# Capítulo 2

## Estado del Arte

La pérdida de materias primas es un problema común a nivel industrial, y existen áreas de la ingeniería que continuamente estudian formas de minimizar la merma. Uno de estos estudios sugiere calcular el rendimiento máximo del proceso de forma teórica, utilizando relaciones estequiométricas de la composición de las materias primas y conociendo a cabalidad las ubicaciones de las pérdidas de masa de interés, haciendo uso de fórmulas matemáticas dependientes de las reacciones químicas del proceso, obteniendo así un resultado de rendimiento ideal. Esto se hace al plantear el siguiente balance de masa [12]:

$$M_{out} = M_{materia} + M_{aditivos} - M_{pérdidas}$$

Con  $M_{pérdidas}$  considerando las deseadas y las no deseadas, en que las primeras mencionadas son esenciales para la transformación de materias primas en producto; por ejemplo, utilizando el presente caso de estudio, el plástico en los fardos de entrada correspondería a una pérdida deseada, mientras que la no deseada sería la fibra en los rechazos de agua. El rendimiento (también llamado *yield*) máximo se consigue cuando las pérdidas no deseadas son nulas. Con ello se puede tener un factor de rendimiento [12]:

$$Yield = \frac{M_{out}}{M_{materia}} \cdot 100\% \quad (2.1)$$

Y con ello, un índice de rendimiento:

$$I_{Yield} = \frac{Yield}{Yield_{máx}}$$

Que se puede utilizar para cuantificar la eficiencia del material en el proceso de transformación y permite identificar cuáles pérdidas de masa son deseadas y no deseadas. Esta metodología ha sido bien recibida en industrias de alimentos que desconocen el potencial de su rendimiento.

Particularmente existe el caso de una manufacturera de papas fritas congeladas, que al utilizar el método distinguieron pérdidas deseadas de no deseadas en la operación de pelado de papas, cuyo índice de rendimiento era aproximadamente 0,92 y permitió identificar mejoras que ahorran 1,7% de las pérdidas. La solución fue encontrar un modelo que re-

lacionaba la cantidad de cáscara removida respecto al tiempo de exposición del vapor, lo que removía alrededor del 95 % de la cáscara y con ello se vio una disminución en la pérdida de materia útil. Se indica también que el rendimiento variará según las características de la materia prima procesada, lo que conseguiría que la eficiencia sea distinta en cada batch [12].

Otro estudio enfocado en la pérdida de insumos útiles fue realizado en una empresa de fabricación de partes que componen un automóvil, en el cual se encontró que se pierde aproximadamente 40 % del material a la entrada debido a la etapa de cortado y formado de la lámina metálica, que corresponde a una pérdida de 288 kilogramos de metal por auto producido, lo que extrapolado a la producción mundial del 2015 entrega una pérdida de 20 millones de toneladas al año. Este mismo trabajo sugirió cambiar los moldes o diseño de cortado de las láminas con el fin de disminuir la merma, además de revelar que gran parte de la pérdida de materia útil se concentraba en la fase de diseño previo a la fabricación, por lo que sugiere cambios en la estructura de modelamiento en sí, dejando estas medidas propuestas para un trabajo futuro [13].

Una industria que siempre está buscando nuevas técnicas para minimizar la pérdida de materia prima útil es la agrícola. Se estudian las mejoras tanto en el proceso de plantado (incluyendo estudios de hibridación de cultivos [14]), como el de post cosecha, en que, por ejemplo, se estudian mejoras para disminuir la ruptura de granos de arroz dentro del molino, notando que se debe controlar el método de enfriamiento luego del secado de los granos de arroz para disminuir la cantidad de granos desechados por fisuras [15].

Por otro lado, también se tienen soluciones genéricas para toda empresa que sufra de estas pérdidas [16]:

- Optimizar el proceso: Encontrar parámetros óptimos de trabajo tales como presión, temperatura, tiempo de operación, etcétera.
- Control de calidad: Ordenar y clasificar materias primas, monitorear procesos para identificar cualquier problema que surja y asegurar que el producto final cumpla con estándares estrictos de calidad.
- Reducción de desechos: Esto se puede lograr usando los productos no deseados o encontrando formas para reutilizar materiales, por ejemplo, en la industria alimenticia se podrían utilizar los rechazos del proceso para obtener nuevos productos (llamados “by-products”), que disminuirían los residuos y aumentarían el rendimiento de la producción.
- Utilización de capacidad: Optimizar la utilización de capacidad es otra estrategia para maximizar el rendimiento. Esto puede involucrar la programación de la producción para asegurar que tanto la maquinaria como los operadores están trabajando con eficiencia.

Con todo lo anterior es posible ver que la pérdida de materia prima útil es una problemática que se repite en diversos rubros a nivel industrial, y permanentemente se están buscando soluciones para disminuir la merma producida, incluso definiendo estrategias para enfrentar esta pérdida, como se ve en el listado anterior.

En el caso de la industria papelera, el enfoque actual es revalorizar los lodos obtenidos por la pérdida de fibra útil en lugar de la reducción de esta, es decir, se tiene el enfoque de

“reducción de desechos” mencionado en la lista anterior. Se proponen procesos de destintado y secado para que luego los bloques sólidos sean utilizados como combustible de las calderas o sea vendido a otra empresa para que le den el uso correspondiente [17]. Un estudio anterior respecto al tratamiento de fibra útil sugiere el uso de la enzima *Esterasa* para la remoción de contaminantes en la fibra útil recuperada que después re ingresaré al proceso, sugiriendo también un método de separación por gravedad mediante el uso de coladores o cribas para remover los residuos de gran tamaño de la fibra [18].

Sin embargo, el presente estudio se enfoca en reducir la pérdida de fibra útil en vez de reingresarla al proceso, deseando solucionar el problema al tener el enfoque “uso de la capacidad” según el listado anterior, también buscando optimizar el proceso con este fin. El objetivo principal radica en minimizar la pérdida de fibra útil en lugar de buscar soluciones posteriores a su pérdida; esta perspectiva no solo busca reducir los costos asociados con el tratamiento de efluentes y la necesidad de procesar más materia prima, sino que también apunta a optimizar el proceso de elaboración del papel tissue en su totalidad, mejorando la eficiencia operativa de la Planta y también promoviendo la sostenibilidad ambiental al minimizar los residuos producidos.

# Capítulo 3

## Antecedentes

Softys es una empresa productora de papel tissue, teniendo el 72% del mercado nacional. Para la elaboración de sus productos terminados que serán vendidos a público general, es necesaria la obtención del producto de transición denominado “Jumbo”, cuyo proceso de fabricación es el que será estudiado en el presente trabajo.

A continuación se profundizará en el proceso de estudio, examinando sus operaciones unitarias con sus respectivos flujos de entrada y salida.

### 3.1. Detalle del proceso

A continuación se detallan las macrofases del proceso:

1. Disgregación: En esta fase ingresan fardos de papel reciclado, los cuales según la receta puede contener distintos niveles de tintado (sin tintado, levemente tintado o muy tintado), además de contener residuos no aptos, como plásticos provenientes de tapas de cuadernos, espirales plásticas o metálicas, etcétera. Además, ingresa fibra celulósica según su proporción con el papel reciclado, que es distinta según la receta de Jumbo a fabricar; y también entra agua entre 35 °C y 45 °C al equipo, el cual es un disgregador (“Pulper”) que reduce el tamaño de la materia prima y la incorpora con el agua, obteniendo un flujo de salida cuya consistencia es de 4%, es decir, tiene 4 kilos de papel por cada 100 litros de agua. Este equipo debe ser limpiado una vez por turno, lo cual consigue que haya un rechazo mayoritariamente de agua y de residuos de gran tamaño, pero que también contiene fibra de papel.

En operación normal, el flujo de salida del Pulper va a un separador, el cual tendrá dos flujos de rechazo: un rechazo liviano de plásticos menores a 1 cm, y uno pesado, el cual contiene metales de menor tamaño como corchetes y clips. El primer mencionado va a un equipo de separación por vibración que cuenta con un tamiz de 4 milímetros; en que residuos mayores a ese tamaño quedarán retenidos en los tamices y serán rechazados a drenaje, mientras que el aceptado vuelve al Pulper inicial. Por otro lado, el rechazo pesado del separador llega a un hidrociclón que separa el flujo de entrada por densidades, por lo que rechaza a drenaje elementos metálicos y su aceptado vuelve al Pulper inicial. Se presenta un diagrama de la fase a continuación:

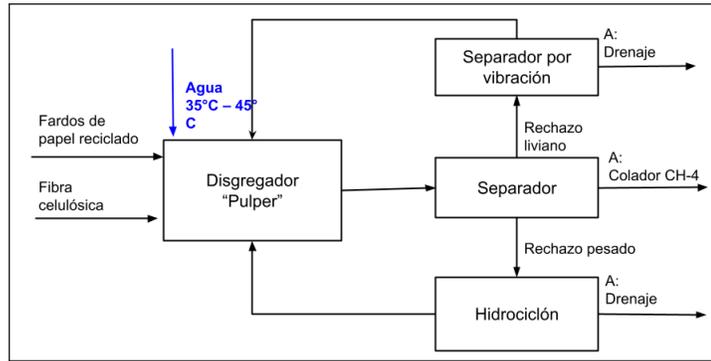


Figura 3.1: Diagrama de bloques de la fase de Disgregación. Elaboración propia.

2. Depuración: El aceptado del Separador entra a la fase de Depuración, cuyo objetivo es remover impurezas de menor tamaño. El flujo va a tanques intermedios antes de pasar a la primera operación unitaria; la cual consiste en un colador (llamado “CH-4”) que posee un tamiz de 1,6 milímetros y un flujo de entrada de agua debido a que su condición de funcionamiento es a una consistencia de 3 %. El rechazo de este Colador es direccionado a otro equipo de separación de funcionamiento cíclico que cuenta con un tamiz de 1,4 milímetros; su rechazo va a drenaje, mientras que su aceptado, a otro Colador (denominado “CH-3A”) que tiene un tamiz de 0,2 milímetros, el cual redirecciona su aceptado a los tanques intermedios anteriores al CH-4 y su rechazo, a drenaje.

El aceptado del Colador CH-4 es llevado a los Despastilladores, que no tienen un flujo de rechazo ya que es una operación mecánica que elimina los grumos del flujo de entrada mediante discos que ejercen presión sobre la pasta de papel.

Esta pasta sin grumos entrará al tercer colador denominado “CH-5”, cuyo tamiz es de 0,2 milímetros y trabaja a una consistencia de 3 %; su rechazo es redireccionado al CH-3A y su aceptado, al Espesador, el primer equipo de la fase de dispersión.

A continuación se presenta un esquema del sistema de coladores:

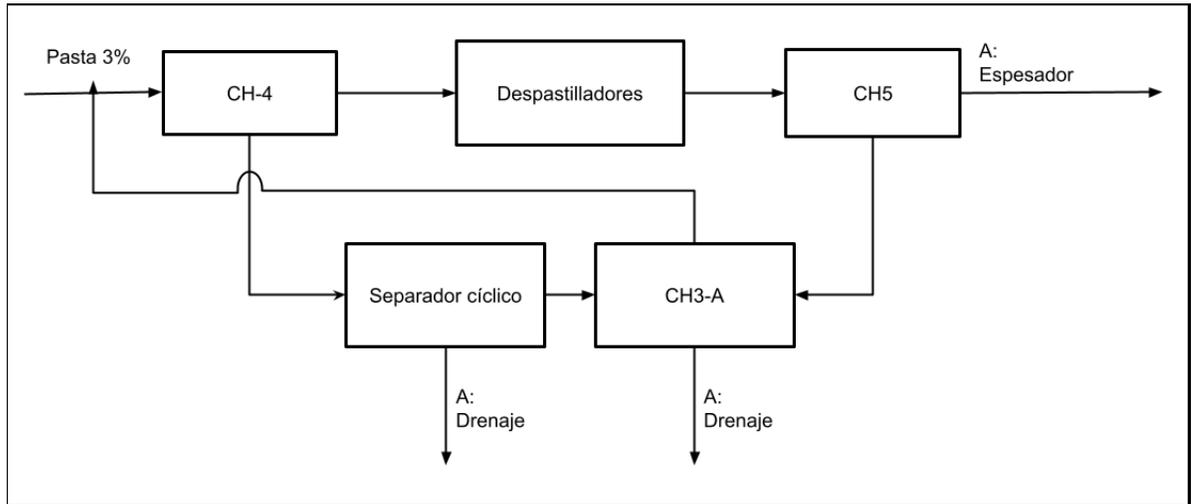


Figura 3.2: Sistema de coladores y despastilladores en Depuración. Elaboración propia.

3. Dispersión: La macrofase de dispersión tiene la finalidad de remover los contaminantes microscópicos que no se pudieron remover mecánicamente en las fases anteriores, para lo cual se utiliza maquinaria que dispersa la pasta de papel a temperaturas cercanas a los 100°C al final de esta etapa.

La pasta proveniente de depuración ingresa al Espesador que, como bien indica su nombre, hace la pasta más espesa. Esto es realizado mediante una malla filtrante que drena el agua del flujo de entrada, aumentando la consistencia hasta 6 % aproximadamente. El agua filtrada contiene fibra y llega a un tanque de agua fibrosa, mientras que la pasta más consistente ingresa al siguiente equipo.

El aceptado de la fase de espesado llega a tornillos estrujadores denominados Tornillo 50 y Tornillo 51, los cuales aumentan la consistencia a aproximadamente 11 % y poseen tamices de 1,5 milímetros; y el agua extraída de esta operación llega al mismo tanque de agua fibrosa que el filtrado del Espesador.

El equipo posterior a los Tornillos estrujadores corresponde a la Prensa Doble Tela, la que consta de dos telas que presionan la pasta de papel y aumentan su consistencia hasta el 30 % y filtran su agua. Esta última llega al mismo tanque de agua fibrosa que el agua rechazada del Espesador y de los Tornillos.

Por último, la pasta de alta consistencia es transportada mediante un tornillo sinfín al Disperguer, el cual lleva la pasta de papel a 100°C haciendo uso de vapor para elevar la temperatura de la mezcla por condición de operación del equipo, y similar a los Despastilladores, el Disperguer no tiene flujo de agua de salida al ser una operación mecánica, pero sí cuenta con una entrada de agua para controlar la consistencia en su interior, evitando que se tranque.

A continuación se presenta un diagrama de funcionamiento de la etapa:

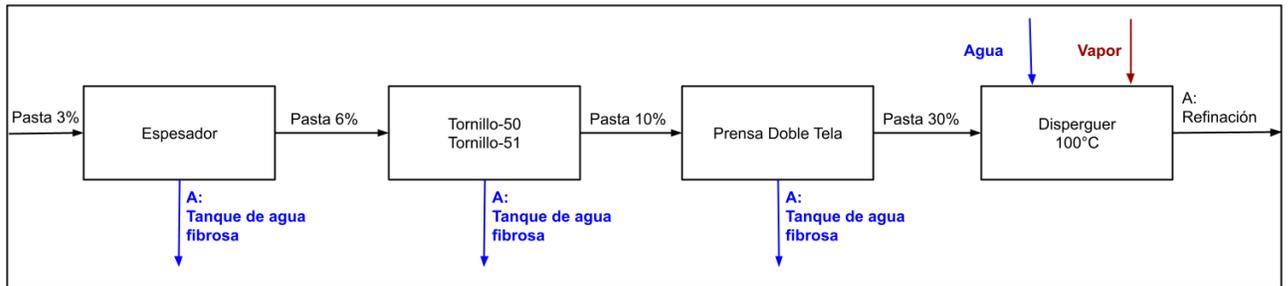


Figura 3.3: Diagrama de bloques de la fase de Dispersión. Elaboración propia.

4. Refinación: El objetivo de esta fase es aumentar la tensión superficial de la pasta de papel al hacer más finas sus fibras, logrando que estas hagan un entretejido más complejo, pudiendo obtener una hoja firme y resistente.

Debido a las condiciones de trabajo del Refinador, la consistencia de la pasta es disminuida a 4,5 % en el tanque entre fases. La refinación es una operación mecánica que no cambia su consistencia, por lo que este equipo no tiene rechazos de agua.

Posterior al refinado, se disminuye la consistencia del flujo hasta un 0,7 % aproximadamente, y luego se hace pasar por cuatro series de Hidrociclones, esto con el fin de eliminar los últimos residuos. El rechazo de la cuarta serie va a drenaje, mientras que el aceptado de la primera serie de Hidrociclones va al Colador Vertical previo a la Máquina Papelera; los rechazos 'bajan' de fase en fase, mientras que los aceptados, 'suben'.

El objetivo de la Máquina Papelera es la formación de la hoja, llegando a una humedad de 6 % en papel. La Máquina tiene varios rodillos y está conformada por telas y fieltros que permiten, en primer lugar, generar la formación de la hoja de papel y, en segundo lugar, drenar el agua de la fibra. Dentro del equipo existe una etapa de secado con energía, que consta de un cilindro con una superficie a 150°C en un lado con vapor y con una inyección de aire caliente al otro [19]. A continuación se presenta un diagrama de bloques:

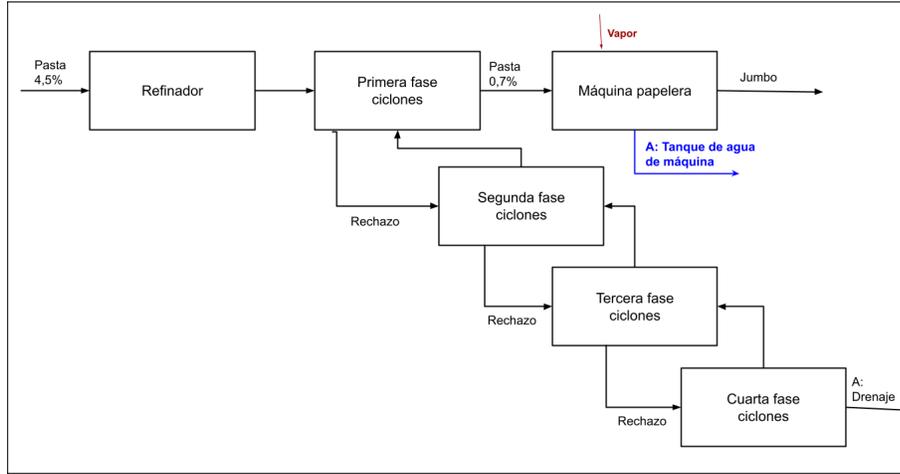


Figura 3.4: Diagrama de bloques de la fase de Refinación. Elaboración propia.

Como es posible ver tanto en el diagrama visto en la Introducción (Figura 1.1) como en los diagramas de cada fase por separado, las macrofases tienen rechazos de agua con dos tipos de final: drenaje o procesamiento de lodos. Los rechazos contienen material fino, tales como astilla, ceniza, suciedad de los equipos, plásticos de menor tamaño, etcétera; sin embargo, estos efluentes también pueden contener un porcentaje no despreciable de fibra útil. Esta fibra corresponde a filamentos de papel que cumplen con un largo entre 74 y 2000 micrómetros, y podrían haber sido aprovechados por el proceso, pero están siendo desechados vía drenajes de cada fase, lo que se traduce como una pérdida de utilidades para la empresa.

Anteriormente se trabajó en cuantificar el flujo másico de pérdida de fibra útil en cada uno de los equipos de la línea, y en la siguiente sub sección se exponen los resultados de esta tarea.

### 3.2. Caracterización de flujos másicos

Se realizaron mediciones de flujo másico de pérdida de fibra útil por cuatro semanas, para lo cual se midió porcentaje de consistencia, flujo volumétrico de rechazo y porcentaje de fibra útil, sus metodologías de medición se detallan en el Anexo A. La cantidad de pérdida de fibra útil se obtuvo con la siguiente ecuación:

$$M \left[ \frac{kg_{util}}{dia} \right] = F \left[ \frac{L}{s} \right] \cdot \%Consistencia \left[ \frac{kg_{fibra}}{L} \right] \cdot \%Fibra_{util} \left[ \frac{kg_{util}}{kg_{fibra}} \right] \cdot \frac{3600[s]}{1[hr]} \cdot \frac{14[hr]}{1[dia]} \quad (3.1)$$

En que las catorce horas en el último factor corresponde a las horas del día en que las máquinas se encuentran en funcionamiento para la receta estudiada.

Las mediciones de las cuatro semanas se promediaron para obtener las pérdidas de fibra útil por operación unitaria; y a continuación se presenta la distribución de pérdidas por ma-

crofase:

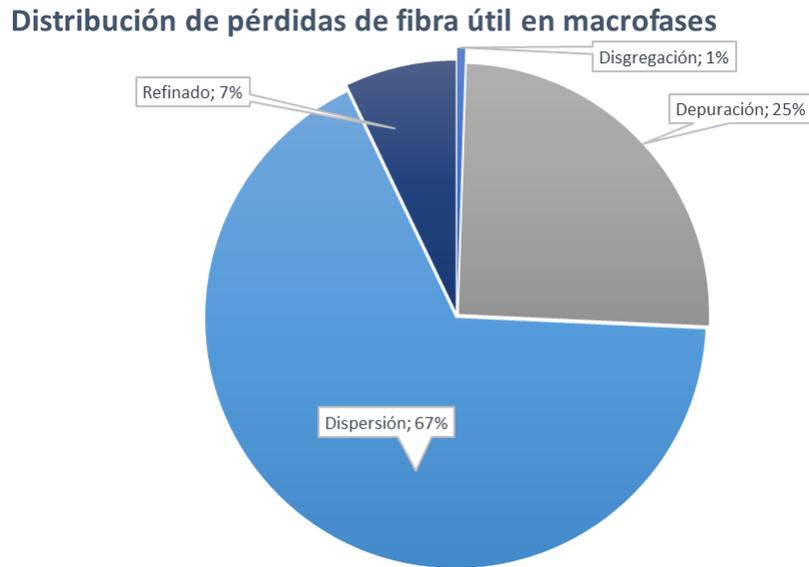


Figura 3.5: Distribución porcentual de pérdidas de fibra útil según macrofases. Elaboración propia.

En que se destaca la fase de dispersión por tener el 67% de distribución de las pérdidas. Se profundiza en esta fase a continuación.

## Fase de Dispersión

El objetivo de esta fase es aumentar la consistencia de la pasta y remover residuos pegajosos llamados “stickies”, los cuales son causados por componentes orgánicos en papel reciclado, pudiendo provenir del tintado de los papeles del fardo, plásticos, adhesivos, etcétera; y afectan negativamente al producto final.

Esta fase se compone de cuatro equipos:

1. Espesador de Papel Viejo.
2. Tornillos estrujadores: Tornillo 50 y Tornillo 51.
3. Prensa Doble Tela.
4. Disperguer.

Como se mencionó anteriormente, el Disperguer no tiene rechazos de agua, por lo que no se le dará enfoque en este trabajo. El resto de equipos tiene la siguiente distribución de pérdida de fibra útil respecto a total de la fase:

### Distribución de pérdida en dispersión

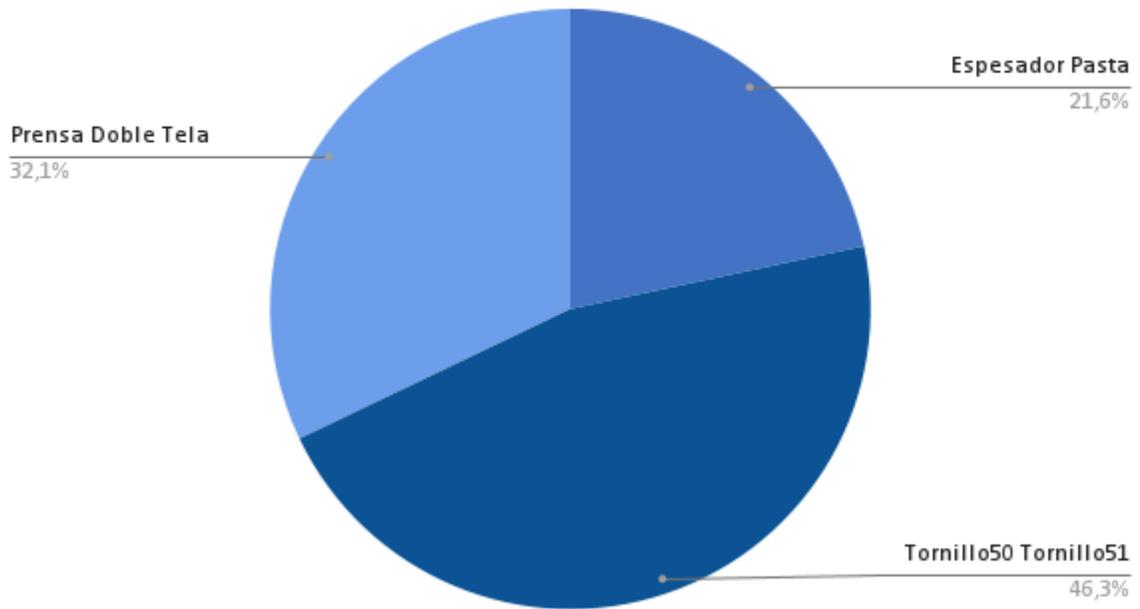


Figura 3.6: Distribución de pérdida de fibra útil en la fase de dispersión según sus equipos. Elaboración propia.

Y la línea de procesamiento asociada a estos tres equipos corresponde a:

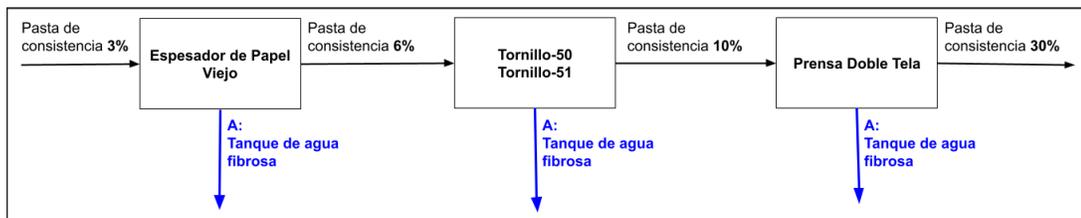


Figura 3.7: Diagrama de bloques de equipos que conforman la macrofase de dispersión. Elaboración propia.

El funcionamiento de cada uno de los equipos se detalla a continuación.

## Espesador de Papel Viejo

El Espesador de Papel Viejo tiene el siguiente funcionamiento:

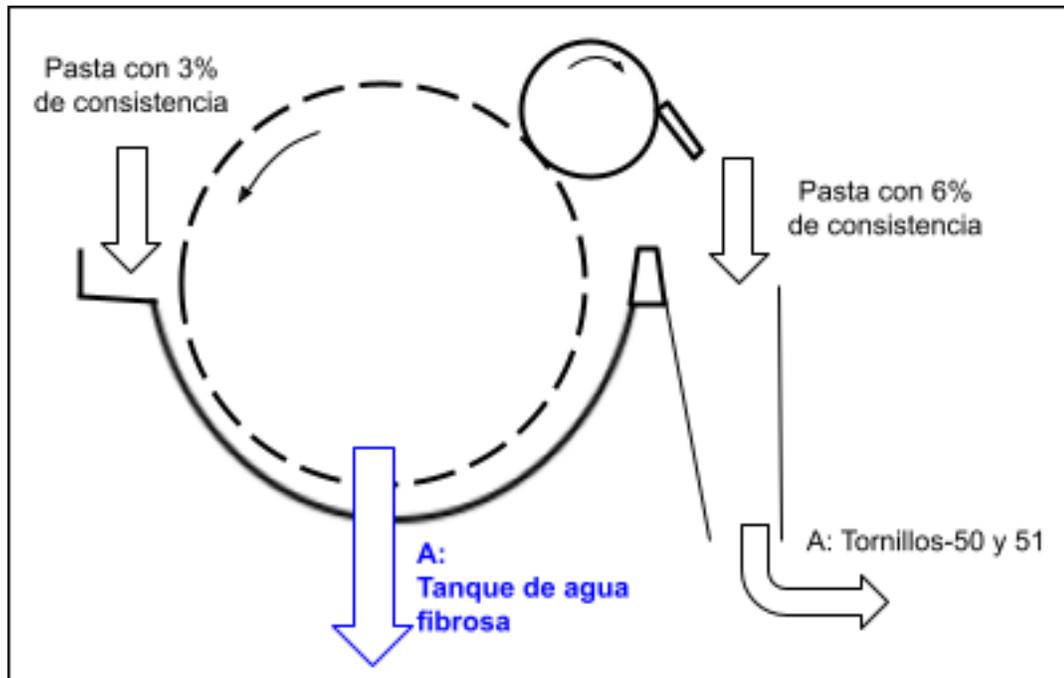


Figura 3.8: Diagrama de funcionamiento de Espesador de Papel Viejo. Elaboración propia.

El equipo cuenta con un tamiz cilíndrico de tipo bombo rotatorio (círculo punteado en la imagen), un rodillo tomador (círculo más grueso sobre el tamiz), un raspador de toma (sobre el rodillo tomador) y un listón de madera de roble que genera una altura entre la batea donde cae la pasta de entrada y el canal de salida.

La pasta ingresa a un 3% y cae en la artesa de hormigón, que es parecida a una tinaja, en donde se sumerge parcialmente el bombo, el cual gira a una velocidad determinada por el usuario que se encuentra en el rango de 800 – 1500 rpm. La pasta a la entrada se adhiere al tamiz giratorio y evacúa el agua a través de sus perforaciones, subiendo por el bombo hasta llegar al rodillo tomador, el cual produce un punto de presión (llamado “nip”) que extrae agua por el estruje, obteniéndose pasta de 6% de consistencia. Posteriormente, la pasta es recogida por el raspador que la deja caer al canal transportador que llevará la pasta a los Tornillos 50 y 51.

El agua filtrada de la pasta de entrada cae por los bastidores laterales y luego al canal colector. Esta agua también lleva finos, astillas, cenizas y fibra útil.

## Tornillos estrujadores

Los Tornillos estrujadores funcionan de la forma indicada a continuación:

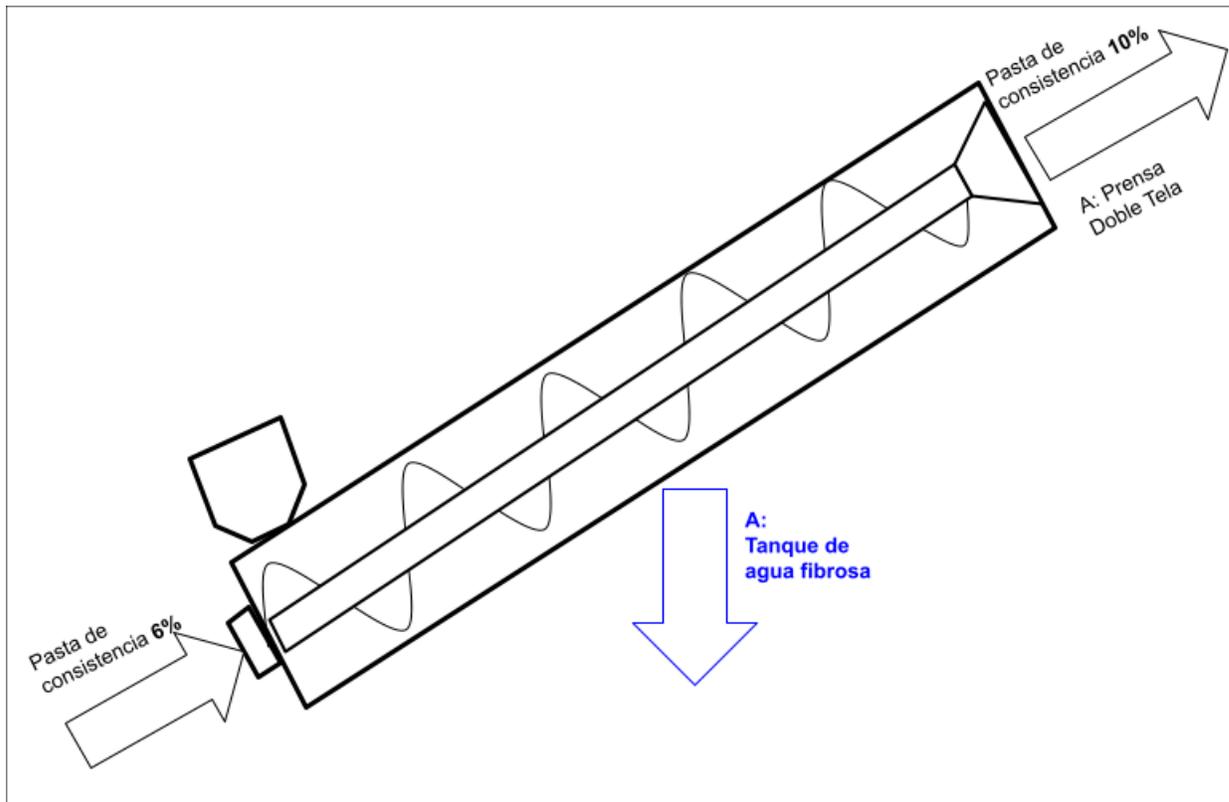


Figura 3.9: Diagrama de funcionamiento de Tornillos estrujadores. Elaboración propia.

El principio de funcionamiento de estos equipos es el del Tornillo de Arquímedes, en que el tornillo inclinado desplaza líquidos mediante la rotación de sus aspas, siendo ampliamente utilizado para bombeo, y en la modernidad se utiliza para plantas de tratamiento de agua, aunque su uso se ha extendido a otros rubros debido a su facilidad de transportar líquidos con sólidos en suspensión [20].

Los Tornillos estrujadores extraen agua de la pasta de entrada, aumentando su consistencia entre un 4 % y un 5 %. Esto lo hacen al girar a velocidad constante dentro de un tamiz cilíndrico, drenando el agua por los tamices y subiendo la pasta a mayor consistencia hasta el canal transportador, llevando a la Prensa Doble Tela una pasta de consistencia de aproximadamente 10 %. El agua extraída llega al mismo tanque de agua fibrosa que el filtrado del Espesador.

## Prensa Doble Tela

La prensa sube la consistencia de 10% a 30% como se indica en las siguientes figuras:

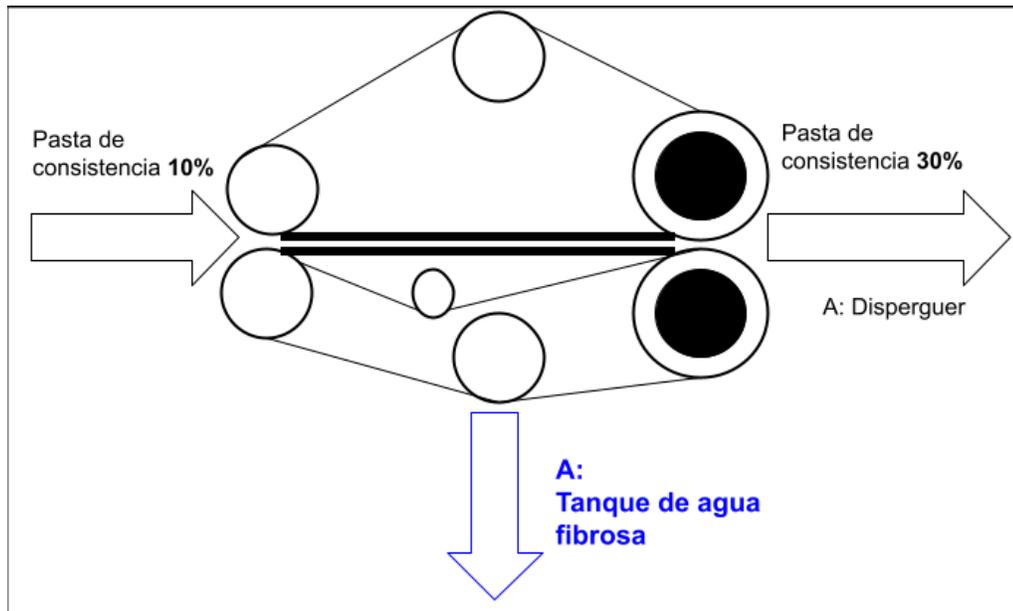


Figura 3.10: Diagrama de funcionamiento de la Prensa Doble Tela. Elaboración propia.

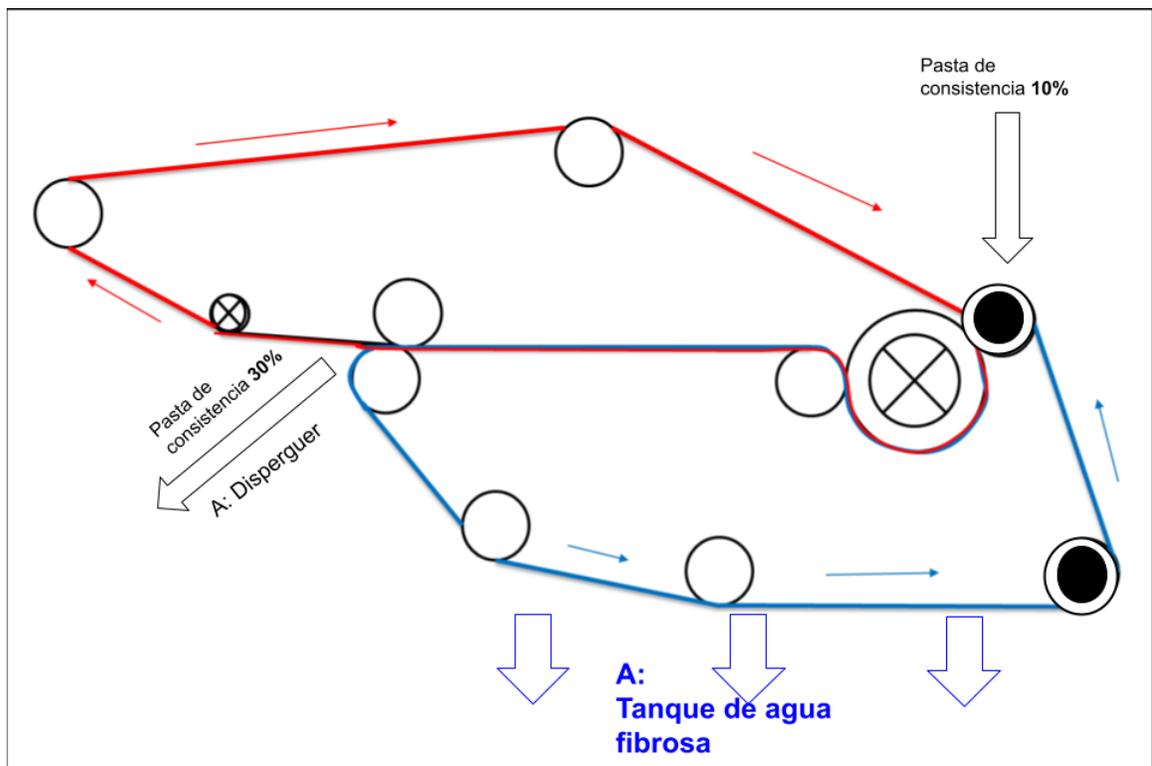


Figura 3.11: Diagrama detallado del funcionamiento de la Prensa Doble Tela [21].

En que en la imagen anterior se diferencia el recorrido de ambas telas que componen la operación, con la tela inferior en color azul y la tela superior en rojo.

La pasta a 10 % de consistencia ingresa por una caja de nivel ubicada sobre la tela superior, cayendo entre ambas telas y luego pasando por el primer estruje de rodillos. Posteriormente recorre en sentido horario con ambas telas formando una lámina de pasta que drena agua continuamente, pasando por un último nip antes de que las telas se aparten y continúen con su ciclo, dejando caer al canal transportador pasta de papel de consistencia de 30 % que irá al Disperguer. El agua filtrada también llega al tanque de agua fibrosa que los filtrados del Espesador y de los Tornillos.

## **Rechazos de agua**

En la fase de dispersión se filtra el agua de la pasta para aumentar la consistencia hasta 30 % antes de llegar al Disperguer, lo que permite deducir que los porcentajes de fibra útil en los rechazos son altos (mayores que 70 %) debido a que no se eliminan residuos en la fase, por lo que sus filtrados tienen una menor cantidad de finos y de ceniza. Esta fibra terminará en tratamiento de lodos, que tiene un costo asociado por tonelada de lodo tratada, además de que su pérdida se puede traducir como un costo de oportunidad, es decir, la ganancia potencial si se vendiera la fibra que se pierde en los RILes.

En consecuencia, minimizar la fibra que se dirige al tratamiento de lodos (pérdida no deseada) implica reducir los costos de producción y mejorar la eficiencia operativa de la línea; lo que se refleja en la ecuación de *yield* expuesta en el Estado del Arte (ecuación 2.1).

Junto con esto, la disminución de fibra útil en los filtrados implica una menor generación de lodos luego del tratamiento de agua, es decir, se genera un menor volumen de residuos, alineándose con la política cero residuos de Softys.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, surge la necesidad de implementar mejoras en la fase de dispersión para disminuir la pérdida de fibra útil, lo que motiva la realización del presente trabajo.

# Capítulo 4

## Definición de escenarios

Con el fin de disminuir la pérdida de fibra útil en los rechazos de agua, se proponen cambios en el funcionamiento de los equipos de la fase de dispersión: Espesador de Papel Viejo, Tornillos 50 y 51 y Prensa Doble Tela. En total, estos equipos concentran el 67 % de la pérdida del proceso, por lo que amerita realizar cambios en la maquinaria ya mencionada; estos cambios se definirán como “escenarios” para el resto del trabajo, y para definirlos se utilizará la siguiente metodología.

### 4.1. Metodología

Se realizará un levantamiento de información del funcionamiento teórico de la maquinaria, averiguando las condiciones estándares de operación según manuales del equipo y exigencias de producción, definiendo rangos de flujos y consistencia de los filtrados, es decir, el rango de fibra útil que se perdería en condiciones estándar. Se hará una comparación de estas condiciones teóricas de trabajo respecto al modo de operación actual y se identificarán las falencias presentes que alejan el funcionamiento actual del establecido por estándares tanto de manuales como de objetivos internos de producción, definiendo escenarios que permitan que la fase de dispersión trabaje minimizando la pérdida de fibra útil y cumpliendo con las exigencias de la línea productiva.

Se verificarán los escenarios obtenidos con el personal experto del área con el fin de corroborar su plausibilidad. Junto con esto, se harán revisiones de los escenarios con los proveedores, esperando que entreguen soluciones de tecnología actual que permitan cumplir con lo solicitado en cada uno de los escenarios, tomando en cuenta también acotaciones técnicas y posibles ajustes necesarios para que el escenario sea técnicamente factible en base a los productos que tengan a disponibilidad para la venta en Chile.

## 4.2. Resultados

### Espesador de Papel Viejo

#### Funcionamiento teórico

Un Espesador de tambor rotativo consiste en una malla metálica semi sumergida en una tinaja donde se recibe la pasta de entrada, y la rotación de esta malla circular hace un cambio de presión en el fluido que permite que este se adhiera al tambor, filtrando el agua mientras gira. Además, el equipo cuenta también con un rodillo sólido que aplica presión en la pasta, logrando un mayor estruje de agua con este contacto y aumentando la consistencia de 2 % a 6 % aproximadamente.

El equipo también posee regaderas de alta presión que limpian la malla de filtrado, limpiando sus poros y así consiguiendo que la pasta se adhiera a esta y que parte de su contenido de agua se filtre; y luego de ser puntualmente estrujada por el rodillo sólido es finalmente removida por un raspador que conecta el rodillo con la cañería de salida, ingresando así a los tornillos estrujadores. El agua filtrada debe salir a una consistencia entre 0,1 % y 0,4 %.

Si se aumentara la consistencia de entrada, al estar más próxima a la consistencia objetivo de 6 %, el agua que se debe drenar es menor y por ello puede permanecer menos tiempo filtrándose, por lo que se debe aumentar la velocidad de giro. En el caso contrario, si la consistencia disminuye, se debe disminuir la velocidad para asegurar un correcto drenaje del agua, de este modo la pasta estará más tiempo en la malla y aumentará la consistencia al 6 % que debe ingresar a los tornillos estrujadores.

El cambio de velocidad ante un cambio de consistencia se puede justificar mediante relación de ecuaciones. En primer lugar, se tiene el tiempo de residencia para un Tambor Aglomerador [22]:

$$t_{res} = 1,77 \cdot \alpha^{0,6} \cdot \frac{L}{S \cdot \omega \cdot D} \quad (4.1)$$

En que  $\alpha$  es el ángulo de reposo del mineral en grados,  $L$  la longitud del tambor en pies,  $S$  la inclinación del tambor en grados,  $\omega$  la velocidad de giro en rpm y  $D$  el diámetro de tambor en pies. Notemos que lo único que varía de esos parámetros es la velocidad de giro, lo que resultaría en expresar la ecuación 4.1 como:

$$t = \frac{a}{\omega}$$
$$a = 1,77 \cdot \alpha^{0,6} \cdot \frac{L}{S \cdot D}$$

Se desea encontrar una relación de la velocidad de giro del equipo con la consistencia de su flujo de entrada, por lo que le hacemos un balance de masa al agua en una porción de pasta del espesador:

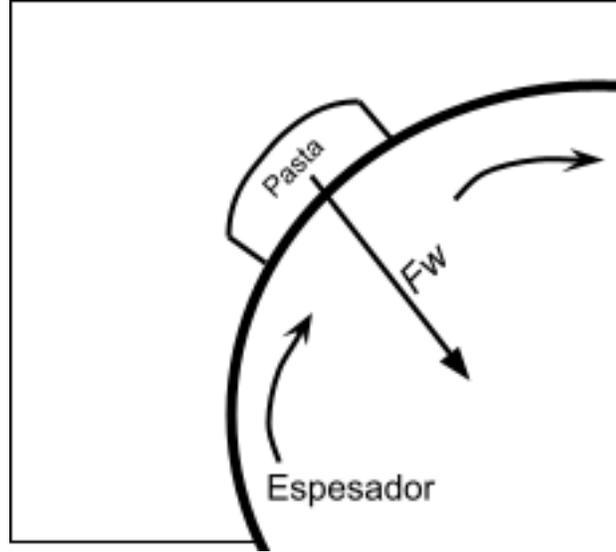


Figura 4.1: Balance de masa a una lámina de pasta en el Espesador de Papel Viejo. Elaboración propia.

$$\frac{dM_w}{dt} = -F_w \quad (4.2)$$

Con  $F_w$  el flujo de agua filtrada por la malla del espesador, y como el filtrado depende sólo de la porosidad del medio, es constante. Despejamos:

$$\Leftrightarrow dM_w = -F_w \cdot dt$$

$$\Leftrightarrow M_{w,out} - M_{w,in} = -F_w \cdot (t_{out} - t_{in})$$

$$\Leftrightarrow M_{w,out} - M_{w,in} = -F_w \cdot t_{res}$$

$$\Leftrightarrow t_{res} = \frac{M_{w,in} - M_{w,out}}{F_w} \quad (4.3)$$

Con  $M_{w,out}$  la masa de agua a la salida y  $M_{w,in}$  la masa de agua a la entrada. Considerando que la bomba que ingresa flujo al Espesador tiene una capacidad de  $1.600 \left[ \frac{L}{min} \right]$  y que la consistencia de salida es de 6% por condición de funcionamiento de los Tornillos, los flujos de agua de entrada y salida del equipo se pueden expresar como sigue:

$$M_{w,in} = (100\% - \%consistencia) \cdot 1.600 \left[ \frac{L}{min} \right] \quad (4.4)$$

$$M_{w,out} = 94\% \cdot 1.600 \left[ \frac{L}{min} \right] = 1.504 \left[ \frac{L}{min} \right] \quad (4.5)$$

Reemplazando en 4.3:

$$t_{res} = \frac{1.600 \cdot (100\% - \%cons.) - 1.504}{F_w}$$

Reemplazamos en 4.1:

$$\frac{1.600 \cdot (100\% - \%cons.) - 1.504}{F_w} = \frac{a}{\omega}$$

Despejamos  $\omega$  para que dependa de la consistencia de entrada, la que se abreviará como “ $\%c$ ”.

$$\leftrightarrow 1.600 \cdot (100\% - \%c) = \frac{F_w \cdot a}{\omega} + 1.504$$

$$\leftrightarrow 100\% - \%c = \frac{F_w \cdot a}{1600 \cdot \omega} + 0,94$$

Definimos  $b = \frac{F_w \cdot a}{1600}$ :

$$\leftrightarrow 0,06 - \%c = \frac{b}{\omega}$$

$$\leftrightarrow \omega = \frac{b}{0,06 - \%c}$$

Y como la consistencia va entre 0,02 – 0,04; el denominador no será cero, por lo que no se indefina la fracción; y si  $\%c$  se acercara a 6%, significa que el Espesador no es necesario ya que su salida se encuentra a la consistencia de entrada de los Tornillos.

Vale notar que si aumenta  $\%c$ , disminuye el valor del denominador, lo que aumenta todo el valor de la fracción; pudiendo concluir que si se aumenta la consistencia de entrada aumenta la velocidad del Espesador. Se puede hacer el mismo razonamiento para el otro caso, en que si se disminuye  $\%c$  también lo hace la fracción y, por ende, resulta en una velocidad menor.

La reflexión anterior tiene sentido, puesto que si entra con una mayor consistencia, necesita un menor tiempo de filtrado y por ende se debe aumentar la velocidad; mientras que a menor consistencia de entrada, debe ser mayor su tiempo de residencia en la malla para aumentar el filtrado con el fin de que llegue al 6% necesario, por lo que se debe disminuir la velocidad del motor.

## En operación

El Espesador posee velocidad variable, y cuenta también con un desagüe en caso de que suceda un rebalse. Si ingresara mayor flujo al equipo, debe aumentarse su velocidad para que logre procesar a tiempo toda la pasta que ingresa sin que se rebalse el Espesador; sin embargo, los operadores a cargo del proceso no modifican la velocidad ante un aumento de caudal de entrada ya que es un parámetro poco preciso y carece de soluciones estandarizadas. Esto podría ser una de las causas de la pérdida de fibra útil en este equipo.

Los cambios en la consistencia de entrada no se pueden medir continuamente en la condición actual de trabajo, esto porque se carece de un flujómetro o un transmisor de consistencia entre el Espesador y el Colador anterior a él (CH-5). La velocidad del equipo de estudio es modificada cuando hay consistencia alta en la entrada de los Tornillos estrujadores, lo cual no es monitoreado continuamente y es una solución tardía al problema. Además, la herramienta

que se puede utilizar para medir la consistencia de entrada al Espesador es muy pesada y requiere supervisión para ser utilizada, dificultando la medición de consistencia en el punto de interés.

## Propuestas de mejora

Se sugiere la instalación de un controlador PID que modifique la velocidad del Espesador ante cambios en la consistencia de entrada para asegurar tanto un drenaje correcto como que no ocurra rebalse en el equipo, minimizando la pérdida de fibra útil en el drenaje y por contingencia.

Junto con esto, después de una inspección técnica se reveló que el brazo mecánico que ajusta el nip está mal calibrado, dejando más presión en un lado que en otro y no haciendo efectivo el estruje puntual, y esto sumado a que el equipo es de una tecnología antigua, sugiere el reemplazo de este equipo junto con los Tornillos estrujadores para tener una única máquina que extraiga agua de la pasta de papel llevándola de un 3 % a un 10 %.

## Tornillos estrujadores

### Funcionamiento teórico

El equipo es un Tornillo de Arquímedes, el cual es ampliamente utilizado en empresas de hidroenergía tanto como generador o como transportador [23], y en el caso de estudio, se utiliza para la extracción de agua de la pasta de papel. La consistencia óptima de salida de los tornillos es entre 12 % y 15 % [24], y la consistencia del agua clara filtrada debiera estar entre 0,4 % y 0,8 % según estándares de la línea.

Un mayor ingreso de caudal a los Tornillos implica un rebalse interno que logra un filtrado deficiente, esto ya que la pasta no es completamente procesada a la velocidad fija del motor, lo que consigue que parte de la fibra salga junto con el agua drenada. Esto se puede compensar al variar la velocidad del Tornillo, ya que a mayor velocidad aumenta su capacidad de drenaje de agua, lo que es posible ver en la siguiente expresión [25]:

$$F = \frac{N_{tor} \cdot V_w \cdot \omega}{2\pi}$$

Con  $N_{tor}$  la cantidad de aspas del Tornillo,  $V_w$  el volumen de agua en una rotación del aspa y  $\omega$  la velocidad de giro del Tornillo.  $V_w$  se puede ver más claro en la siguiente figura:

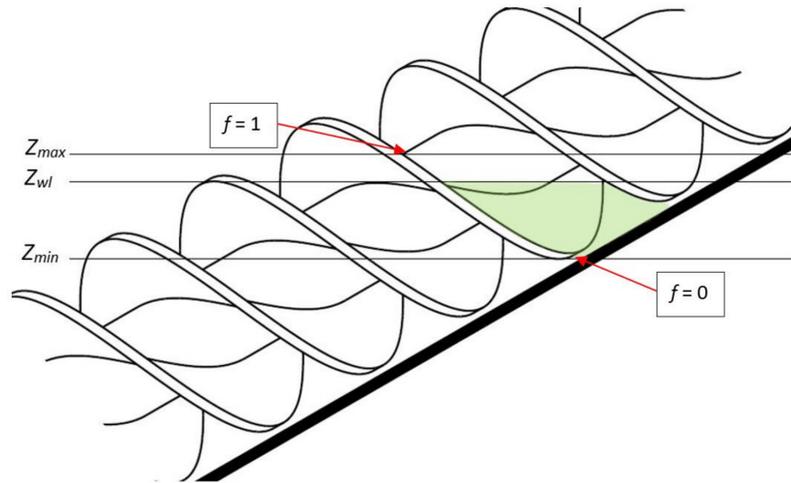


Figura 4.2: Nivel de agua en una rotación del asa de un Tornillo de Arquímedes [25].

Esta definición es utilizada cuando el Tornillo se encuentra parcial o completamente sumergido en un medio en aplicaciones de energía hidroeléctrica. En este caso, como el interior del Tornillo se llena para procesar la pasta, se supone  $V_w$  constante; y  $N_{tor}$  es siempre constante, así obtenemos una relación directamente proporcional, en que:

$$F = K \cdot \omega \leftrightarrow K = \frac{F}{\omega}$$

Esto significa que ante un aumento de caudal, debe aumentar la velocidad de giro del motor del Tornillo para mantener constante el volumen interno procesado para el equipo.

Por otro lado, el Tornillo cuenta con un cono de presión de acero inoxidable que permite ajustar la consistencia de salida. Este cono genera una contrapresión en la salida que ocasiona un estruje, filtrando una mayor cantidad de agua que tiene menor cantidad de fibra, sin embargo, disminuye el caudal de salida del equipo. En condiciones estándar, este cono se encuentra en uso y ajustado para la obtención de un caudal volumétrico que cumpla con las exigencias de producción. Las tecnologías actuales cuentan con un sistema de contrapresión hidráulica que permite aumentar la consistencia a la salida de su equipo y mejorar la eficiencia de estruje [26] [27].

### En operación

Actualmente los Tornillos estrujadores tienen un motor de velocidad fija y la consistencia del filtrado oscila entre 0,6% y 1,2%; siendo mayor que la teórica (0,4% – 0,8%). Esto es debido a que, por exigencias de producción, se abre la válvula de paso de flujo para procesar más pasta, pero al tener velocidad fija los Tornillos pierden eficiencia de estruje, lo que resulta en una mayor salida de fibra por el filtrado.

Los cabezales cónicos se encuentran en desuso, con uno de los Tornillos sin esta pieza. Esto significa que el procesamiento de la pasta de entrada debe ocurrir a un caudal constante, ya que en caso de que se aumente no existen medidas que aseguren un estruje correcto puesto que la velocidad de giro del equipo es constante, lo que conlleva a un aumento de fibra en los

rechazos de los Tornillos al tener un estruje deficiente.

El retiro de los cabezales cónicos fue debido a exigencias de producción, en que se fabricaba una receta con altos porcentajes de papel reciclado y también se debía procesar un mayor caudal para cumplir con el tonelaje diario, por lo que los cabezales eran un obstáculo al necesitar mayor tonelaje de producción. Los sistemas de contrapresión afectan el flujo de salida del equipo, lo que se ha visto en prensas de tornillo que tratan pulpa termoquímica y pulpa termoquímica-blanqueada [28]. Esto también se puede ver con la ecuación de caudal:

$$F = v \cdot A$$

En que  $F$  es el caudal de salida,  $v$  es la velocidad lineal del Tornillo y  $A$  el área transversal que atraviesa el caudal. Como la velocidad de giro del equipo es constante, su velocidad lineal es constante ya que  $v = \omega \cdot r$ ; sin embargo, hay un cambio de área al instalar el equipo de contra presión (el cabezal cónico en este caso), que al permitir que se forme una torta de pasta, disminuye el área de salida del flujo, lo que logra que también disminuya el caudal de salida de pasta de los Tornillos. Por ende, si se desea más producción, se debe aumentar la velocidad del equipo o el área de salida, y como se mencionó antes, el equipo tiene velocidad de giro constante; luego se debe aumentar el área de salida al quitar los cabezales de contra presión.

Las condiciones de producción cambiaron con las reformas a la Máquina Papelera, aumentando el porcentaje de fibra celulósica en el papel y la velocidad de procesamiento del equipo; esto logró un cambio de prioridades, en que se prefiere minimizar la pérdida para obtener un producto final de mayor calidad en vez de maximizar la producción con una calidad mediana.

### **Propuestas de mejora**

Se propone el uso de los cabezales cónicos de contra presión al extremo de los Tornillos, lo que permitirá operar a un mayor caudal para cumplir con las necesidades de producción y además se conseguirá un mejor filtrado de agua debido a la formación de la torta de pasta en el extremo superior del equipo. Uno de los Tornillos ya posee este cabezal, por lo que se propone realizar pruebas de uso para ver el efecto de su instalación en la línea.

Se plantea también instalar un variador de frecuencia (VDF) que permita transformar los Tornillos de velocidad fija a un equipo con velocidad variable. Existieron preocupaciones por efectos del torque generado en el motor, para lo cual se debe hacer una comparación de la corriente en servicio respecto a la nominal del equipo (39 Ampere para ambos Tornillos), y si es menor a un 75 % de la corriente nominal, el VDF podrá ser instalado sin problema, por lo que se medirá la corriente solicitada para ambos Tornillos.

Por otro lado, debido a la antigüedad de la tecnología se sugiere también hacer un cambio del equipo por uno más moderno y que reemplace tanto los Tornillos como el Espesador, teniendo un único equipo que lleve la consistencia de 3 % a 10 % y que asegure un rechazo de agua de consistencia menor a 0,4 %.

# Prensa Doble Tela

## Funcionamiento teórico

En el proceso productivo, la pasta de papel contiene fibras de menor tamaño que son llamadas “finos”, además de ceniza, microplásticos e impurezas del agua en la pasta, y todo esto se adhiere a la tela de la Prensa, afectando negativamente su drenaje. Es por ello que el lavado de la tela es uno de los factores claves para asegurar una correcta extracción de agua en la fase de prensado y para prolongar la vida útil del material [29].

El lavado de la tela debe ser con regaderas en formato discontinuo de tipo aguja con presiones entre 17 a 28 bar con regaderas oscilatorias [30]. Esto debido a que si las toberas fueran estáticas, la tela sufriría franjeo, en que zonas de la tela de prensado se mantienen tapadas, viéndose como “franjas”. Una explicación se ve en la imagen a continuación:

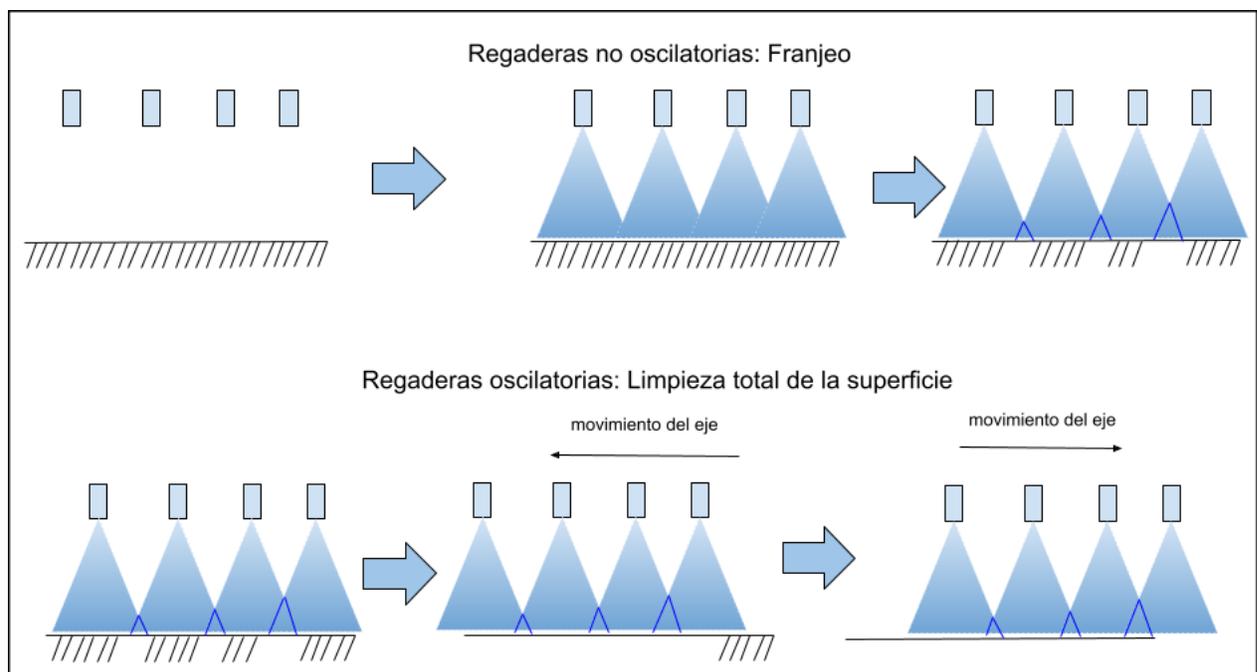


Figura 4.3: Franjeo en la tela al utilizar regaderas no oscilatorias. Elaboración propia.

## En operación

Actualmente, la Prensa de 2,86 metros de largo cuenta con una regadera provisional no oscilatoria de 15 toberas equiespaciadas por 20 mm cada una, las cuales son de tipo abanico de 45° y su presión de trabajo no atraviesa la tela, es decir, su limpieza es insuficiente al no remover la suciedad en los poros.

Junto con esto, las regaderas se utilizan en formato discontinuo debido a que el exceso de agua en las telas podría afectar la consistencia de la pasta, no logrando llegar a la consistencia objetivo de 30 % que es condición de operación del Disperguer, el cual a menor consistencia no trabaja de forma eficiente y entrega pasta de menor calidad.

## Propuestas de mejora

La estructura de la Prensa tiene espacios en que anteriormente habían regaderas para la limpieza de las telas, pero estas fueron removidas. Tomando en cuenta estos espacios, la ubicación de las regaderas provisionales y el sistema utilizado para el rodillo, se propone la ubicación de las regaderas según la siguiente imagen:

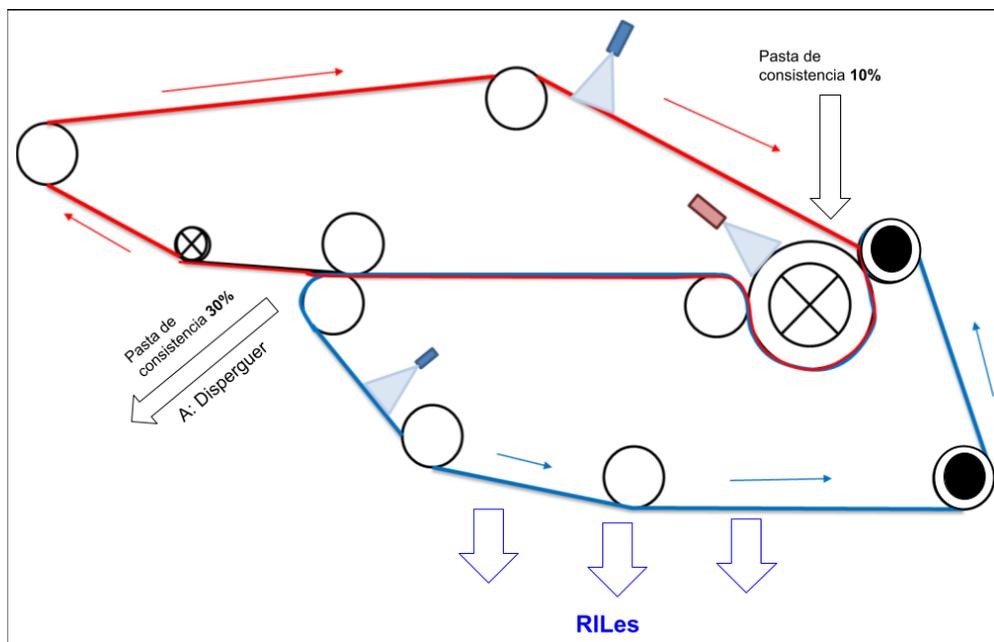


Figura 4.4: Ubicación de Regaderas en Prensa Doble Tela. Elaboración propia.

Se hace la distinción entre las regaderas de baja presión (en azul) y la regadera de alta presión (en rojo, de borde más grueso).

Las regaderas de baja presión deben trabajar entre 5 – 10 bares debido a la fragilidad del material, además de que, con el fin de que el proceso de limpieza y destaponamiento de las boquillas sea menos complejo y ahorre tiempo a los operadores de mantenimiento, se cotizará un sistema que tenga un accionamiento de limpieza vía válvula externa y que además tenga un tubo externo que permita la mantención de las regaderas sin tener que desmontar su estructura de instalación. Por otro lado, la regadera de alta presión debe trabajar entre 20 – 30 bares para la correcta limpieza del Rodillo; y se reemplazarán las regaderas de alta presión ya instaladas con un sistema de las mismas características que el de baja presión, pero que opere a las presiones de trabajo requeridas.

Junto con lo anterior, las regaderas de baja presión deben ser eficientes en el lavado para que permitan su uso en régimen discontinuo. El uso permanente del sistema de regaderas podría dejar las telas mojadas, causando que la pasta de papel no se pueda adherir a su superficie o afectando la consistencia de la lámina que se forma en el proceso, y es un requisito que la consistencia a la salida de este equipo sea de 30 % para una dispersión correcta.

Con la instalación de las regaderas se evitará el franjeo en la tela y prolongará su vida útil, además de mejorar su capacidad de drenaje. Esto disminuirá la pérdida de fibra útil en

el rechazo ya que las telas no estarán taponadas, y por ende no resbalará la fibra de estas, además de asegurar un mejor filtrado.

## Cambio a tecnología moderna

Como se estableció en las secciones anteriores, los equipos distan de cumplir con su funcionamiento teórico, y al tener alrededor de treinta años en servicio, se propone cambiar los equipos estudiados por alternativas más modernas.

En la actualidad, plantas de Softys de otras naciones utilizan un equipo llamado “Washer”, que como indica su traducción, lava la fibra de entrada, esto con el fin de eliminar los finos. La pasta entra a aproximadamente 3% de consistencia, y utiliza una malla sintética para remover los finos como ceniza, tinta y otros contaminantes, removiendo también el agua de la pasta [31]; y al tener un doble nip, ocurre un doble estruje, con lo que la pasta sale del equipo a consistencias entre 12% – 15%, mientras que el filtrado saldría entre 0,25% – 0,4% con bajo contenido de fibra útil (se estima entre 2% – 4%) [32]. Este equipo reemplazaría al Espesador y a los Tornillos.

Por otro lado, para reemplazar la Prensa Doble Tela se puede utilizar una Prensa horizontal de tornillo llamada *ScrewPress* que lleve la consistencia de 10% a 30%. Los beneficios que traería este cambio sería suprimir el consumo de agua, y una mantenibilidad sencilla como la que se tiene actualmente; en la que si fallan las telas de la prensa, basta con la adquisición de nuevas telas de reemplazo, mientras que la maquinaria moderna cuenta con tamices fácilmente removibles que permiten su reemplazo sin cambiar todo el equipo [33].

### 4.2.1. Escenarios obtenidos

A partir de la recolección de información anterior, se establecen los siguientes escenarios:

1. Instalación de un lazo control en el Espesador de Papel Viejo con tal de que varíe la velocidad del motor del equipo cuando existan perturbaciones en la consistencia de entrada.
2. Instalación de cabezales cónicos en el extremo superior de los Tornillos estrujadores para mejorar el filtrado de la pasta.
3. Instalación de un variador de velocidad en el motor de los Tornillos estrujadores que permita cambiar la velocidad de operación ante cambios en el caudal de entrada.
4. Instalación de regaderas de tipo aguja, oscilatorias, con un sistema de limpieza interno de cepillos metálicos y un tubo interno deslizante en la Prensa Doble Tela.
5. Cambio del Espesador y los Tornillos por un único equipo que lleve la consistencia de 3% a 10%.
6. Cambio de la Prensa Doble Tela por un equipo que lleve la consistencia de 10% a 30%.

### 4.3. Discusiones parciales

Todos los cambios se proponen para una receta másica en particular que no es 100% reciclada, por lo que es menos densa y exige menor esfuerzo a los equipos debido a la menor cantidad de horas de operación diaria (14 en vez de 24). Esto sugeriría estudiar el efecto de los cambios propuestos sobre la elaboración de una receta con mayor porcentaje de fibra reciclada o de fibra más densa.

Los Tornillos se asumieron similares a los que son utilizados en el rubro de hidroelectricidad (tornillos de Arquímedes para generar potencia), los cuales no tratan sólidos en suspensión, por lo que sus ecuaciones no consideran las pérdidas de carga por roce o la viscosidad del fluido, lo que genera una resistencia extra en el equipo. Otras ecuaciones que permitían relacionar las variables de interés requerían integrar en ángulos internos y externos, información que no se puede obtener en la configuración actual; por lo que fue necesaria hacer una simplificación del sistema que no considera propiedades del flujo de entrada que generan una resistencia adicional.

Se realizó la aproximación del Espesador estudiado a un Tambor Aglomerador, esto debido a que son similares en cuanto a forma y a modo de trabajo, ya que ambos son cilíndricos y realizan un cambio en la masa del flujo de entrada a partir de la operación mecánica de rotación. Sin embargo, estos equipos difieren en los rubros en que son aplicados, esto debido a que el Tambor permite obtener partículas de mayor tamaño al promover el contacto entre finos y gruesos, haciéndolo un equipo de alta aplicabilidad en minería; mientras que el Espesador cuenta con una malla filtrante que permite obtener un sólido con menor contenido de agua, teniendo más aplicabilidad en procesos de tratamientos de RILes y en el proceso de fabricación de papel.

## 4.4. Conclusiones parciales

Se cumplió el objetivo en su totalidad, ya que se lograron definir escenarios de trabajo a partir de la información conseguida además de conocer las condiciones ideales de operación.

Existen propuestas de mejora para los equipos que tienen mayor pérdida de fibra útil que no implican el reemplazo total de estos, obteniendo soluciones de menor complejidad que podrían resolver el problema, reflejando lo visto en la bibliografía consultada, en que las soluciones ante la pérdida de la materia prima útil son de baja complejidad.

En cuanto a las aproximaciones de la ecuación de diseño del Espesador, se recomienda encontrar un modelo de relación entre la velocidad y el tiempo de residencia que también considere el caudal másico de entrada, la capacidad de filtración de la malla y la resistencia de filtración de la pasta; esto con el fin de tener un modelo más preciso de la relación entre las variables de interés del escenario (consistencia de entrada y velocidad) y posteriormente encontrar la función de transferencia para el lazo control.

Para el caso del variador en los Tornillos, de forma análoga al lazo en el Espesador, se sugiere encontrar una ecuación más adecuada al escenario que relacione el caudal de entrada con la velocidad del motor. Esto puede ser encontrando el valor de  $V_w$  en la ecuación 4.2 o mediante modelos matemáticos que consideren propiedades de la pasta de entrada y velocidad de giro.

El siguiente paso del trabajo implica la evaluación de los escenarios propuestos, ya sea a través de pruebas en terreno o mediante estudios teóricos, dependiendo de las condiciones de operación previamente definidas. Este proceso permitirá validar las propuestas de mejora y ajustar los modelos teóricos según sea necesario, asegurando un enfoque integral para optimizar el rendimiento de los equipos estudiados.

# Capítulo 5

## Desempeño de escenarios

En la sección anterior se encontró información sobre las condiciones estándares de trabajo de los equipos a inspeccionar: Espesador, Tornillos estrujadores y Prensa Doble Tela. Además, se identificaron restricciones que impiden su funcionamiento conforme a dichos estándares, lo que permitió determinar las modificaciones necesarias en cada equipo para posibilitar su operación en las condiciones deseadas, definiendo estos cambios como “escenarios”. Estos escenarios según la información recolectada son:

1. Lazo control en el Espesador para ajustar la velocidad del equipo ante variaciones de consistencia a la entrada.
2. Cabezal cónico en los Tornillos estrujadores para ejercer una contrapresión a la pasta, lo que conseguiría un mejor estruje y por ende una mayor eficiencia.
3. Variador de Frecuencia en los Tornillos para que se tenga una velocidad variable que permita procesar los aumentos de caudal.
4. Sistema de regaderas en Prensa Doble Tela, cuyo fin es limpiar las Telas y destaponarlas para que la pasta se adhiera y filtre correctamente.
5. Cambio a tecnología moderna por un *Washer* que reemplace al Espesador y a los Tornillos.
6. Cambio a tecnología moderna por una *ScrewPress* que reemplace a la Prensa Doble Tela.

Los tres primeros escenarios pueden ser probados en terreno, examinando el efecto de los cambios en el filtrado de los equipos a partir de variaciones en el flujo de entrada; mientras que los últimos tres se pueden inspeccionar haciendo uso de la teoría. Así, se define la siguiente metodología de trabajo.

## 5.1. Metodología

Se realizarán pruebas físicas de los escenarios planeados cuando el escenario lo permita, observando el desempeño de los equipos estudiados para verificar si la alternativa genera cambios significativos, ya sean o no beneficiosos.

Por otro lado, en caso de que no sea posible hacer una prueba en físico ya sea por complejidad del escenario o dificultad de replicar las condiciones necesarias, se trabajará con supuestos obtenidos a partir de la teoría, provenientes tanto de valores por manual como de reuniones con proveedores.

Por último, se cotizará el valor de la implementación de cada alternativa, considerando tanto la adquisición de equipos, su instalación, entre otras cosas que el proveedor incluya en el valor final.

## 5.2. Resultados

### 5.2.1. Mejoras para el Espesador de Papel Viejo

#### Lazo control en el Espesador

Para instalar un Lazo control en el Espesador es necesario un instrumento de medición, cuyo valor dependerá del grosor de la cañería de entrada al equipo (a mayor grosor de la cañería, mayor será el valor del instrumento). El montaje de este se debe realizar con una empresa externa, mientras que la instalación eléctrica, se debe ver con personal de electro-control. En este caso en particular, el diámetro de entrada de la cañería del equipo es de 8 pulgadas.

Se consultó por costos de tendido de conductor, en que se considera la instalación eléctrica asociada a cables de transmisión, de alimentación, al galvanizado, montaje de cañerías y pruebas de funcionamiento [34].

Para la elección del mejor sensor se necesitaron definir los siguientes parámetros:

- Rango de consistencias de entrada: 2 % – 4 %.
- Rango de flujos de entrada (mínimo – máximo): 26, 88 – 92, 16 toneladas al día (memoria de cálculo en el anexo B).
- Densidad de flujo tratado: Debido a que existe un rango de temperaturas de trabajo y de consistencias, se tiene la siguiente tabla (memoria de cálculo en el anexo C):

Tabla 5.1: Densidad del flujo de entrada del Espesador en rango de condiciones de trabajo. Elaboración propia.

	2 % $\left[ \frac{kg_{fibra}}{kg_{total}} \right]$	4 % $\left[ \frac{kg_{fibra}}{kg_{total}} \right]$
35 °C	0,984 $\frac{gr}{cm^3}$	0,974 $\frac{gr}{cm^3}$
45 °C	0,980 $\frac{gr}{cm^3}$	0,970 $\frac{gr}{cm^3}$

- Viscosidad:  $762 \left[ \frac{mg}{L} \right]$  [35].
- Temperatura de trabajo: Entre  $35^{\circ}\text{C}$  y  $45^{\circ}\text{C}$ .

Ya que el flujo volumétrico de entrada al Espesador se mantiene constante y sólo cambia la consistencia de este, se sugiere la adquisición e instalación de un sensor de consistencia en vez de un flujómetro aunque tenga un mayor costo de adquisición [36].

Se tiene la hipótesis de que, ante un cambio de consistencia en la entrada, variar la velocidad según corresponda permite obtener un filtrado de menor consistencia, como se vio en las ecuaciones de la sección anterior (véase despeje de ecuación 4.3. Esto se examinó mediante balance de masa:

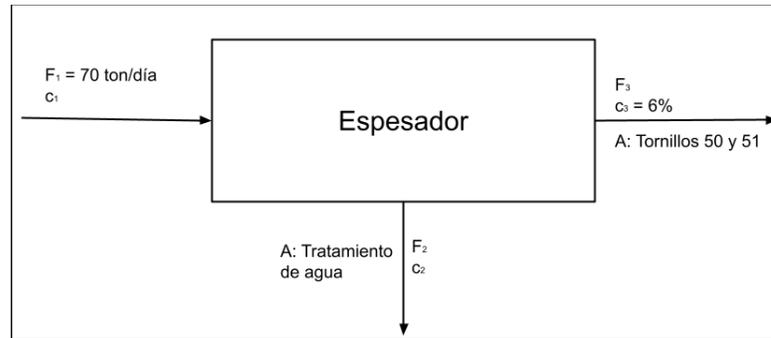


Figura 5.1: Balance de masa en el Espesador. Elaboración propia.

En que  $F_1 = 70 \left[ \frac{ton}{dia} \right]$  debido a que es la exigencia de producción de la línea, y  $c_3 = 6\% \left[ \frac{kg}{L} \right]$  por condición de operación de los Tornillos estrujadores. Los balances volumétricos y de masa del equipo son:

$$F_1 = F_2 + F_3$$

$$F_1 \cdot c_1 = F_2 \cdot c_2 + F_3 \cdot c_3$$

Se tomaron consistencias para comprobar la hipótesis, obteniendo una consistencia de 2,56 % a la entrada ( $c_1$ ) y 0,2 % en el filtrado ( $c_2$ ) mientras el equipo trabajaba a 1.500 rpm. Al despejar  $F_1$ :

$$F_1 \cdot c_1 = 70 \left[ \frac{ton}{dia} \right]$$

$$\Leftrightarrow F_1 = \frac{70.000 \left[ \frac{kg}{dia} \right]}{2,56\% \left[ \frac{kg}{L} \right]} = 2.737.375 \left[ \frac{L}{dia} \right] = 2.737.375 \left[ \frac{L}{dia} \right] \cdot \frac{1[dia]}{14[hr]} \cdot \frac{1[hr]}{3.600[s]} = 54,25 \left[ \frac{L}{s} \right]$$

Del balance volumétrico se despeja:

$$F_2 = F_1 - F_3$$

Y reemplazando en el balance de masa:

$$\begin{aligned}
54,25 \left[ \frac{L}{s} \right] \cdot 2,56 \% \left[ \frac{kg}{L} \right] &= \left( 54,25 \left[ \frac{L}{s} \right] - F_3 \right) \cdot 0,2 \% \left[ \frac{kg}{L} \right] + F_3 \cdot 6 \% \left[ \frac{kg}{L} \right] \\
\leftrightarrow 1,3888 \left[ \frac{kg}{s} \right] &= 0,1085 \left[ \frac{kg}{s} \right] - 0,2 \% \cdot F_3 + 6 \% \cdot F_3 \\
\leftrightarrow 1,2803 \left[ \frac{kg}{s} \right] &= 5,8 \% \left[ \frac{kg}{L} \right] \cdot F_3 \\
\leftrightarrow F_3 &= 22,07 \left[ \frac{L}{s} \right] \\
\rightarrow F_2 = F_1 - F_3 &= 32,18 \left[ \frac{L}{s} \right]
\end{aligned}$$

Lo que permite obtener:

$$\begin{aligned}
M_{util} = F_2 \cdot c_2 \cdot \%_{util} &= 32,24 \left[ \frac{L}{s} \right] \cdot 0,2 \% \left[ \frac{kg}{L} \right] \cdot 76,77 \% \left[ \frac{kg_{util}}{kg_{fibra}} \right] = 0,0495 \left[ \frac{kg}{s} \right] \\
M_{util} &= 0,0495 \left[ \frac{kg}{s} \right] \cdot \frac{3.600[s]}{1[hr]} \cdot \frac{14[hr]}{1[dia]} = 2.494,86 \left[ \frac{kg_{util}}{dia} \right]
\end{aligned}$$

En una prueba realizada en terreno, la consistencia de entrada bajó a  $c_1 = 2,14\%$ , pero la consistencia del filtrado se mantuvo en  $c_2 = 0,2\%$ ; con lo que se tiene:

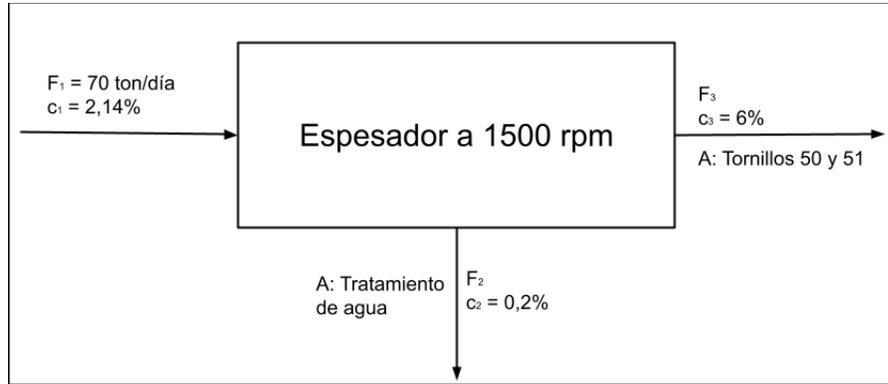


Figura 5.2: Balance de masa al Espesador ante disminución en la consistencia de entrada. Elaboración propia.

Así, el nuevo flujo volumétrico de entrada será:

$$\leftrightarrow F_1 = \frac{70.000 \left[ \frac{kg}{dia} \right]}{2,14 \% \left[ \frac{kg}{L} \right]} = 3.271.028,037 \left[ \frac{L}{dia} \right] = 3.271.028,037 \left[ \frac{L}{dia} \right] \cdot \frac{1[dia]}{14[hr]} \cdot \frac{1[hr]}{3.600[s]} = 64,90 \left[ \frac{L}{s} \right]$$

Y reemplazando en el balance de masa:

$$64,90 \left[ \frac{L}{s} \right] \cdot 2,14 \% \left[ \frac{kg}{L} \right] = \left( 64,90 \left[ \frac{L}{s} \right] - F_3 \right) \cdot 0,2 \% \left[ \frac{kg}{L} \right] + F_3 \cdot 6 \% \left[ \frac{kg}{L} \right]$$

$$\Leftrightarrow 1,3889 \left[ \frac{kg}{s} \right] = 0,1298 \left[ \frac{kg}{s} \right] - 0,2 \% \cdot F_3 + 6 \% \cdot F_3$$

$$F_3 = 21,708 \left[ \frac{L}{s} \right]$$

$$F_2 = 43,192 \left[ \frac{L}{s} \right]$$

Así:

$$M_{util} = 43,192 \left[ \frac{L}{s} \right] \cdot 0,2 \% \left[ \frac{kg_{fibra}}{L} \right] \cdot 76,77 \% \left[ \frac{kg_{util}}{kg_{fibra}} \right] = 0,0663 \left[ \frac{kg_{util}}{s} \right] = 3.342,38 \left[ \frac{kg_{util}}{dia} \right]$$

Que es un aumento de pérdida respecto al caso anterior. Siguiendo la teoría, una disminución de velocidad de trabajo debiese disminuir la pérdida de fibra útil, y obtenemos la nueva velocidad con una regla de tres:

$$v_{nueva} = \frac{1.500[rpm] \cdot 2,14[kg/100L]}{2,56[kg/100L]} \approx 1.254[rpm] \rightarrow 1.250[rpm] \quad (5.1)$$

Al cambiar la velocidad a 1.250 rpm se obtiene una consistencia de 0,06% en el filtrado. Llevamos esto al balance de masa:

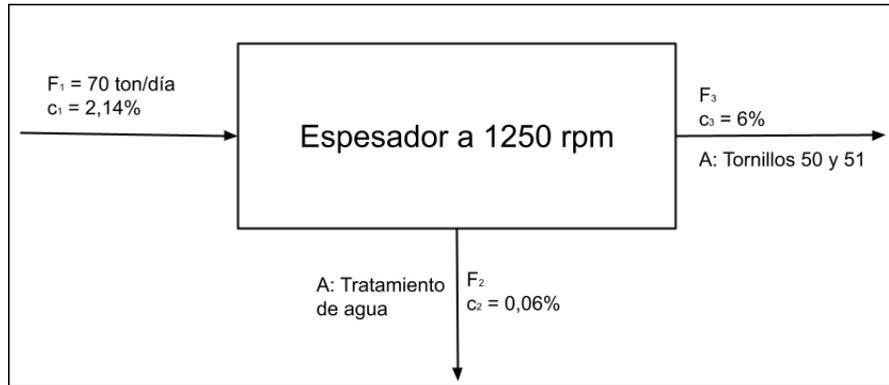


Figura 5.3: Balance de masa al Espesador ante disminución en la consistencia de entrada y a 1.250 rpm. Elaboración propia.

$$64,90 \left[ \frac{L}{s} \right] \cdot 2,14 \% \left[ \frac{kg}{L} \right] = \left( 64,90 \left[ \frac{L}{s} \right] - F_3 \right) \cdot 0,06 \% \left[ \frac{kg}{L} \right] + F_3 \cdot 6 \% \left[ \frac{kg}{L} \right]$$

$$\Leftrightarrow 1,3889 \left[ \frac{kg}{s} \right] = 0,03894 \left[ \frac{kg}{s} \right] - 0,06 \% \cdot F_3 + 6 \% \cdot F_3$$

$$\leftrightarrow 1,3499 \left[ \frac{kg}{s} \right] = 5,94 \% \left[ \frac{kg}{L} \right] \cdot F_3$$

$$\leftrightarrow F_3 = 22,725 \left[ \frac{L}{s} \right]$$

$$\rightarrow F_2 = 42,175 \left[ \frac{L}{s} \right]$$

Calculamos la nueva pérdida de fibra útil:

$$M_{util} = 42,175 \left[ \frac{L}{s} \right] \cdot 0,06 \% \left[ \frac{kg_{fibra}}{L} \right] \cdot 76,77 \% \left[ \frac{kg_{util}}{kg_{fibra}} \right] = 0,0194 \left[ \frac{kg_{util}}{s} \right] = 979,10 \left[ \frac{kg_{util}}{dia} \right]$$

Lo que implica un ahorro de pérdida de fibra útil de:

$$\%ahorro = \frac{2.494,86 \left[ \frac{kg_{util}}{dia} \right] - 979,10 \left[ \frac{kg_{util}}{dia} \right]}{2.494,86 \left[ \frac{kg_{util}}{dia} \right]} \cdot 100 \% = 60,75 \%$$

Es decir, el cambio de velocidad del Espesador ante variaciones en la consistencia de entrada permite un ahorro de hasta un 61 % aproximadamente.

Se desean corroborar estas mediciones, para lo que se medirán los flujos del equipo. La parte del proceso con la que se trabajará se expone a continuación:

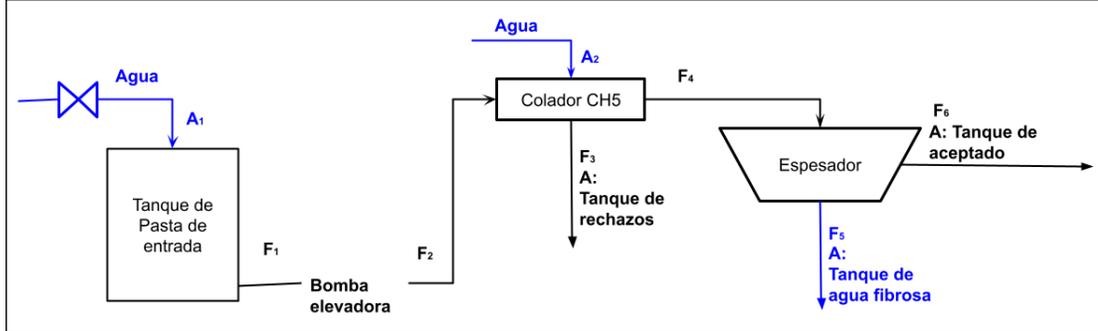


Figura 5.4: Diagrama de fase del entorno de la prueba en el Espesador. Elaboración propia.

Para disminuir la consistencia de entrada al Espesador (en  $F_4$ ) se necesita abrir la válvula de agua sobre el Tanque de pasta de entrada, aumentando también el flujo total de ingreso al Espesador. Un cambio en el flujo de entrada a este equipo implica un aumento en los flujos de salida según el siguiente balance de masa:

$$F_4 = F_5 + F_6$$

En que  $F_5$  es el flujo del filtrado, el cual es el de interés para el estudio. Se puede medir directamente al detener línea, agua de máquina, rebales de otros tanques y cerrar las bombas que vacían el tanque de agua fibrosa para que este sólo reciba el agua del Espesador. Esta medición es compleja de realizar, por lo que se preferirá hacer uso del balance de masa debido

a que medir los otros flujos involucrados ( $F_4$  y  $F_6$ ) es más directo al tener un sensor de nivel en el tanque que los recibe ( $F_6$ ) o proporciones con otros flujos que sí pueden ser medidos con sensor de nivel ( $F_4$ ).

Para obtener el valor de  $F_5$ , en primer lugar, se cerrará la Bomba elevadora para dejar llenando el tanque de pasta de entrada hasta que llegue a aproximadamente 80 %. Este flujo de salida será el mismo de entrada ya que la bomba no tiene pérdidas másicas. En el Colador se tiene el siguiente balance:

$$F_2 + A_2 = F_3 + F_4$$

Y en la Bomba elevadora:

$$F_1 + A_1 = F_2$$

La proporción de aceptado y rechazado en el Colador corresponde a:

$$F_4 = 0,8 \cdot (F_2 + A_2)$$

$$F_3 = 0,2 \cdot (F_2 + A_2)$$

Luego,  $F_4 = 0,8 \cdot (F_1 + A_1 + A_2)$ . Por otro lado,  $F_6$  se puede obtener al cerrar la Bomba para medir la diferencia de llenado del Tanque de aceptado. Así, es posible despejar  $F_5$ :

$$F_5 = F_4 - F_6 = 0,8 \cdot (F_2 + A_2) - F_6$$

En cuanto a velocidad, se hará una regla de 3 simple para escoger el valor de cambio como se hizo anteriormente con los valores teóricos, luego se cambiará la velocidad del motor a esta velocidad nueva, se esperará tres minutos y se medirán los flujos de interés.

## Resultados de la prueba del Espesador

Los resultados de la prueba se presentan a continuación:

Tabla 5.2: Resultados de la Prueba de velocidad en el Espesador según cálculos teóricos. Elaboración propia.

Parámetro	Antes de la prueba (teórico)	Disminución de %cons. (teórico)
%Consistencia de entrada al Espesador $\frac{kg\ fibra}{kg\ total}$	2,56 %	2,14 %
%Consistencia del filtrado antes de cambiar la velocidad $\frac{kg\ fibra}{kg\ total}$	0,2 %	0,2 %
%Consistencia del filtrado después de cambiar la velocidad $\frac{kg\ fibra}{kg\ total}$	–	0,06 %
Velocidad [rpm]	1.500	1.250
Flujo de entrada al Espesador $\frac{L}{s}$	54,25	64,9
Flujo de filtrado del Espesador $\frac{L}{s}$	32,18	42,17
Flujo de salida del Espesador $\frac{L}{s}$	22,07	22,725
Pérdida másica de fibra útil en filtrado $\frac{kg}{día}$	2.494,86	978,99

Tabla 5.3: Resultados de la Prueba de velocidad en el Espesador según cálculos en terreno. Elaboración propia.

Parámetro	Antes de la prueba	Disminución de consistencia
%Consistencia de entrada al Espesador $\frac{kg_{fibra}}{kg_{total}}$	2,56 %	2,14 %
%Consistencia del filtrado antes de cambiar la velocidad $\frac{kg_{fibra}}{kg_{total}}$	0,2 %	0,2 %
%Consistencia del filtrado después de cambiar la velocidad $\frac{kg_{fibra}}{kg_{total}}$	—	0,06 %
Velocidad [rpm]	1.500	1.250
Flujo de entrada al Espesador $\frac{L}{s}$	84,7	67,68
Flujo de filtrado del Espesador $\frac{L}{s}$	3,485	23,285
Flujo de salida del Espesador $\frac{L}{s}$	64,275	30,86
Pérdida másica de fibra útil en filtrado $\frac{kg}{día}$	351,31	704,155

El detalle de su desarrollo se encuentra en el Anexo E. Cabe destacar que según los resultados obtenidos por balance de masa, hay un ahorro de fibra en el rechazo del Espesador luego de la prueba, pero por lo obtenido en terreno, la pérdida aumenta; esto se puede explicar por las estimaciones y suposiciones utilizadas en las mediciones de flujo en terreno, tales como proporciones teóricas entre flujos y aproximaciones de Tanques a cilindros. Debido a esto, se considera lo obtenido según balance de masa para el resto del trabajo; las propuestas de mejora para las mediciones en terreno se detallarán en la sección de Discusiones parciales.

## 5.2.2. Mejoras para los Tornillos Estrujadores

### Cabezales cónicos en el extremo de los tornillos

Se cuenta con un cabezal cónico en el extremo del Tornillo 50, pero en desuso, ya que se subieron ambos cabezales debido a exigencias de velocidad de producción de la máquina, pero ahora esas condiciones cambiaron debido a reformas en la Máquina Papelera. Con el objetivo de verificar su funcionamiento en condiciones estándar, se realizará una prueba en que el cabezal del Tornillo 50 se baje 20 milímetros debido a que los Tornillos Estrujadores de la otra línea de trabajo se encuentran a esta altura y presentan un desempeño satisfactorio en cuanto a producción y consistencia de salida; y cabe destacar que el Tornillo 51 no cuenta con esta pieza, por lo que sólo se podrá estudiar el Tornillo 50 en sus condiciones estándar.

Se utiliza como supuesto que se mantiene la consistencia promedio del filtrado obtenida de mediciones anteriores, es decir, de un 1 %; y se espera que bajar el cabezal de los Tornillos esta consistencia disminuya.

La prueba a realizar se detalla a continuación:

1. Tomar consistencia en el filtrado y en el aceptado de los Tornillos antes de bajar el cabezal.
2. Continuar operación habitual con ambos tornillos en funcionamiento, con el T-50 con el cabezal ajustado. En caso de que no se aprecie el efecto de los cabezales en las consistencias de análisis, se dejará el T-51 fuera de servicio.
3. Tomar consistencia en los mismos lugares dichos en el primer punto cada una hora de

operación.

4. Solicitar la medición de la corriente en vacío y en servicio para ver los efectos del cabezal en la carga del equipo.

Se realizarán medidas de consistencia por toda la semana, esperando que el promedio de estos datos resulte en una consistencia de filtrado menor a la obtenida con el trabajo anterior (1%), en que una disminución del 0,2% en la consistencia conseguirá un ahorro de dos toneladas por día de pérdida. Los resultados de la consistencia promedio a la salida permitirá deducir la plausibilidad de la aplicación de esta medida, ya que en caso de que dé consistencias muy altas podría afectar negativamente el desempeño de la bomba intermedia entre los tornillos y la Prensa Doble Tela.

Si los resultados resultan favorables, se mantendrá en uso el cabezal del Tornillo 50 y además se cotizará el del Tornillo 51. En caso contrario, se descartará el escenario.

## Resultados de la prueba

Los resultados de la prueba se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 5.4: Resultados de la Prueba de Cabezal en Tornillos estrujadores.  
Elaboración propia.

Parámetro	Antes del cabezal	Después del cabezal
Consistencia promedio de salida del Tornillo 50 $\frac{kg\ filtrado}{kg\ total}$	11,32 %	16,34 %
Consistencia promedio de salida del Tornillo 51 $\frac{kg\ filtrado}{kg\ total}$	11,32 %	15,01 %
Consistencia promedio del filtrado $\frac{kg\ filtrado}{kg\ total}$	1 %	0,75 %
Consistencia promedio de filtrado Prensa $\frac{kg\ filtrado}{kg\ total}$	0,8 %	0,14 %
Consistencia promedio de entrada al Disperguer $\frac{kg\ filtrado}{kg\ total}$	28,5 %	31,5 %
Pérdida de pasta por caja de nivel	Flujo constante de bajada por el paño y también al partir la línea.	Sólo al partir la línea.
Porcentaje de corriente respecto a nominal $\frac{Corriente\ en\ vacio}{Corriente\ nominal}$	43 % - 44 %	48 % - 51 %
Porcentaje de pérdidas respecto al total en Dispersión con pérdida en PDT constante $\frac{kg\ perdida}{kg\ total}$	46,3 %	43,9 %
Flujo de filtrado de Tornillos $\frac{L}{s}$	29,15	35,35
Flujo de filtrado de Prensa $\frac{L}{s}$	22,63	19,775

El detalle y desglose del transcurso de la prueba se detalla en el Anexo F. Los resultados fueron favorables, por lo que se cotizó el cabezal del Tornillo 51, obteniendo el valor de compra del set de piezas [37]. Cabe mencionar que para obtener el nuevo flujo de la Prensa Doble Tela se realizó un balance de masa que no consideró el agua de ingreso al Disperguer, puesto que era dificultoso de medir y porque no se visualizó este flujo hasta finales del presente trabajo.

El ahorro total del escenario es de un 49,44%; permitiendo ahorrar 10 toneladas por día de fibra.

## Variador de velocidad en motor de tornillos

Para transformar los tornillos de velocidad fija a velocidad variable, se propone instalar un VDF. Esto podría realizarse sólo si no se está trabajando en valores cercanos a la carga nominal, lo que se pretende corroborar al medir la corriente en vacío y en servicio.

La corriente en vacío se obtiene al medir la corriente del equipo cuando no está procesando pasta de papel, lo que se puede obtener cuando el turno esté recién empezando o cuando la

línea se continúe luego de una detención programada. Por otro lado, la corriente en servicio se puede consultar al eléctrico de turno cuando el equipo haya trabajado al menos una hora en continuo.

Se tomaron ambos valores cuando se estaba fabricando una receta de mayor densidad y de fibra más compacta, obteniéndose la siguiente tabla:

Tabla 5.5: Valores de corriente en Tornillos cuando se está fabricando una receta más densa. Elaboración propia

Tornillo	Corriente Nominal [A]	Corriente en vacío [A]	Corriente en servicio [A]	Porcentaje respecto a nominal	$\frac{Corriente_{uso}}{Corriente_{nominal}}$
T-50	39	17,3	17,2	43% - 44%	
T-51	39	18,2	20	46% - 51%	

Los porcentajes respecto al nominal son lejanos al 75 % que debería estar trabajando según criterio de expertos, por lo que la instalación de variadores de velocidad es plausible sin tener que reemplazar componentes del motor.

Se definen los siguientes parámetros de trabajo del equipo:

- Velocidad de giro: 36,74 [rpm] (medido experimentalmente, medidas en el anexo D).
- Diámetro interno del tornillo: 215 [mm].
- Diámetro externo del tornillo: 395 [mm].
- Altura de elevación del flujo: 1,54 [m].
- Densidad de flujo: Debido a que existe un rango de temperaturas de trabajo, se tienen los siguientes valores:

Tabla 5.6: Densidad del flujo de entrada en  $gr/cm^3$  para el rango de condiciones de trabajo para los Tornillos. Elaboración propia.

		35 °C	45 °C
<b>Consistencia 6 %</b>	$\frac{kg_{fibra}}{kg_{total}}$	0,96349 $\frac{gr}{cm^3}$	0,9598 $\frac{gr}{cm^3}$

- Potencia máxima: 18,5 [kW].

Se obtuvo una cotización que considera la adquisición de dos variadores de velocidad, su integración al panel de control, cableado, galvanizado e instalación de los instrumentos [38].

## Análisis de sensibilidad

La necesidad de automatizar los Tornillos se comprueba mediante un análisis de sensibilidad, en que se verá el efecto de la abertura y del cerrado de las válvulas de caudal de entrada en la consistencia de filtrado. Se modificó el grado de abertura de las válvulas y se tomaron muestras de los filtrados como sigue:

Tabla 5.7: Análisis de sensibilidad de consistencia de filtrado de Tornillos según variaciones en la abertura de la válvula de caudal. Elaboración propia.

Válvula Tornillo 50	Válvula Tornillo 51	%Cons. prom. filtrado Tornillos $\frac{kg_{fibra}}{kg_{total}}$
Base	Base	0,64 %
+1 cm	Base	0,94 %
+1 cm	+1 cm	1,04 %
Base	+1 cm	1,02 %

Tabla 5.8: Análisis de sensibilidad de consistencia de filtrado de Tornillos según variaciones en grado de cerrado de la válvula de caudal. Elaboración propia.

Válvula Tornillo 50	Válvula Tornillo 51	%Cons. prom. filtrado Tornillos $\frac{kg_{fibra}}{kg_{total}}$
Base	Base	1,52 %
-1 cm	Base	1,44 %
-1 cm	-1 cm	1,3 %
Base	-1 cm	1,26 %

En que “Base” corresponde a las mediciones sin mover las válvulas, +1 es abrir la válvula un centímetro y -1, cerrarla un centímetro. Cabe destacar que el análisis de abertura y el de cerrado se tomaron en días distintos, por lo que sus valores de consistencia de filtrado en configuración Base-Base son distintos.

Es posible ver que el sistema sí percibe cambios en las variables de interés ante modificaciones en la abertura de los Tornillos, particularmente cuando ambas válvulas están un centímetro más abiertas la consistencia aumenta un 0,4 %, y si suponemos la misma cantidad de flujo obtenida según los resultados de la prueba del cabezal (ver Tabla 5.4), la pérdida de fibra útil aumenta en 0,14 kilogramos por segundo, lo que se traduce en un aumento de 504 kilogramos por hora.

Cuando se cierran las válvulas disminuye consistencia en la salida de agua, pero también lo hace el caudal de salida del equipo y por ende reduce la producción, por lo que el escenario base, de 7 centímetros, es definido como el punto óptimo de operación según estándares de la empresa, lo que se corroboró con las mediciones actuales.

### 5.2.3. Mejoras para la Prensa Doble Tela

#### Regaderas tipo aguja

Se cotizaron dos sistemas de regaderas de baja presión, cuyo rango de trabajo debe de ser 5 – 10 bar para no perjudicar la integridad de la tela, además de ser oscilatorias y con limpieza manual externa. También se cotizó un sistema de regaderas de tipo aguja con una presión de trabajo de 20 – 30 bar, oscilatorias y con limpieza manual externa, esto con el fin de reemplazar las que ya se tienen.

Fue entregada una cotización que consistía de tres sistemas compuestos de un tubo de regadío de dos pulgadas y media, quince boquillas equiespaciadas de chorro de aguja, cepillo

de acero para la limpieza de las boquillas, un oscilador electromecánico y un tubo externo que facilitará la mantención del sistema al no tener que desmontarla de la prensa. Las especificaciones de presión de trabajo se entregan al momento de la compra [39]. En cuanto a bombas, se espera utilizar la misma que abastece a las regaderas actuales, haciendo cambios sólo en el piping de conexión.

#### 5.2.4. Cambio a tecnología moderna

El cambio a un nuevo equipo podría implicar una disminución en el uso de energía, mejor remoción de finos y una disminución en la pérdida de fibra útil; esto debido a que la tecnología que se utilizaría es más actual respecto a los equipos que se tienen, por lo que su eficiencia de estrujado es mayor al no tener desgaste de piezas; por ende, podría tener beneficios secundarios a pesar del costo más elevado. Estos dos reemplazos serían un *Washer* para reemplazar el Espesador y los Tornillos; y una *ScrewPress* para reemplazar la Prensa Doble Tela. Sin embargo, además del costo de adquisición de equipos, existe el costo asociado al retiro y disposición de maquinaria anterior, por lo que a priori no parecería el escenario más conveniente.

Se obtuvieron cotizaciones de los proveedores de equipos que serían los reemplazos de la maquinaria de estudio [40] [41]. Junto con esto, se solicitaron memorias de cálculo y dimensionamiento con el fin de cuantificar el ahorro de fibra útil en los rechazos de filtrado y posibles costos asociados a intervenciones en terreno.

### 5.3. Ahorro de fibra por alternativas

El ahorro porcentual de fibra útil de la implementación de cada escenario se presenta a continuación:

Tabla 5.9: Porcentaje de ahorro de fibra en los rechazos de cada equipo según el desempeño de cada escenario. Elaboración propia.

Alternativa	%Ahorro de fibra
Lazo control en Espesador	60,69 %
Cabezal en Tornillo 51 (total)	49,44 %
VDF en Tornillo	75,00 %
Regaderas en Prensa	87,50 %
Cambio a Washer	97,53 %
Cambio a Screwpress	75,08 %

### 5.4. Discusiones parciales

La adquisición de un sensor de consistencia es más cara en comparación con un flujómetro para una tubería de seis pulgadas. Sin embargo, como la que se tiene es de ocho, se especula que estará a aproximadamente el mismo precio que el sensor de consistencia, y este último se adapta mejor a la variable de entrada que dicta el comportamiento del filtrado del Espesador según su velocidad.

Se supuso que el porcentaje de fibra útil en los rechazos se mantenía constante, lo que puede afectar el resultado de ambas pruebas realizadas. Sin embargo, como los equipos analizados son los últimos antes del Disperguer y no son de la fase de depuración, se especula que el alto porcentaje de fibra útil no debiera variar significativamente.

Los resultados de la prueba de los Tornillos pueden variar si se desea producir un papel que sea de fibras más empaquetadas y densas, las cuales podrían causar complicaciones con la consistencia del filtrado, ya que decrece cuando aumenta la “libertad” de la pasta de entrada; es decir, la consistencia del filtrado disminuye cuando la pasta tiene mayor drenaje de agua [28]. Es por ello que se especula que cuando se fabriquen recetas con mayor porcentaje de fibra reciclada densa, la consistencia en el filtrado aumentará, lo que significará el tener que cerrar la válvula de caudal o en el peor de los casos volver a subir el cabezal.

Junto con lo anterior, puede que el flujo de filtrado de la Prensa Doble Tela sea distinto al reportado debido a que no se considera el agua de entrada al Disperguer en el balance de masa, por lo que el flujo de entrada a este equipo podría ser menor y, por ende, aumentaría el valor del flujo de filtrado de la PDT. Sin embargo, debido a que la nueva consistencia es menos de la mitad que el valor anterior, se especula que no aumentará la pérdida másica de fibra útil, sólo cambiará el porcentaje de ahorro en el equipo.

Los resultados de flujos medidos en terreno durante la prueba del Espesador distaban mucho de los obtenidos por balance de masa. Esto puede deberse tanto a factores externos como a errores de medición. En primer lugar, se tiene complicaciones con la visualización del nivel del tanque de aceptado, en que el sensor de nivel parece estar mal ubicado al percibir el aumento de forma similar a una función logarítmica en vez de lineal (ver figura E.3), lo que complica la interpretación de los datos; y el tanque de pasta de entrada no guarda el historial de tendencias, teniendo que dejar cargando en segundo plano el visualizador para registrar los cambios; esto no permite ver si el comportamiento del flujo es cíclico, o si las medidas que se toman distan mucho de casos anteriores. Además, los Tanques estudiados no son cilíndricos, sino que tienen una forma de “U”, por lo que también existe un error de cálculo de volumen al haber utilizado la expresión para el volumen de un cilindro.

Las medidas de flujos cuando el Espesador giraba a 1.500 rpm fueron tomadas un día distinto a la realización de la prueba debido a mediciones iniciales poco representativas. Al no tomar las medidas de flujo simultáneamente con las mediciones de consistencia, se da lugar a un mayor error debido a que las condiciones de operación cambian de un día a otro; esto por factores externos como avería de una válvula, uso de distintos equipos debido a mantención programada, distinto flujo de operación, etcétera. Incluso en el mismo día de medición hubo un cambio en el régimen de operación de la bomba elevadora, diferenciando mediciones de inicio del día respecto a las tomadas al final del mismo, lo que refuerza la idea de tomar todas las mediciones posibles que sean lo más cercanas entre sí.

Se utilizó la proporción teórica de aceptado y rechazo del Colador CH-5, lo que es una aproximación muy idealista. Este cambio conseguiría una variación en el valor del flujo de filtrado del Espesador, lo que también cambiaría la cantidad de fibra útil ahorrada. También se supuso que el agua que entra al Colador CH-5 es de un flujo equivalente al de la capacidad de la bomba que la provee, es decir, se supone que la bomba envía agua únicamente

al equipo, lo cual no es real debido a que alimenta a varios equipos intermedios del proceso. El uso de este supuesto permitió no obtener valores negativos de flujo de filtrado, pero esto resultó en valores que no se condicen con la teoría ni de lo visto en terreno, por lo que el error de los valores no está asociado a este supuesto, sino a las mediciones de niveles de tanque.

Junto con lo anterior, el tanque de aceptado no suele permanecer lleno, actuando sólo como un tanque pulmón, por lo que el flujo depende directamente de cuánto esté sacando la Bomba transportadora según necesidades de producción, que conecta el tanque de aceptado con los Tornillos estrujadores. Luego, puede que los flujos medidos en este tanque no sean representativos del régimen de trabajo habitual.

Los resultados del análisis de sensibilidad hacen surgir el dilema de la necesidad de automatización de un equipo. Por un lado se tiene la minimización de la pérdida de fibra útil ante cualquier alteración a la corriente de entrada, pero por otro lado, se aumenta la complejidad del sistema al tener un instrumento de medición que sólo puede ser revisado y arreglado por personal de electrocontrol.

Cabe destacar en el análisis mencionado anteriormente, sólo la última medida no se condice con lo esperado, en que al abrir la válvula del Tornillo con cabezal instalado y manteniendo más cerrada la válvula del Tornillo-51 disminuye más la consistencia del filtrado, cuando la consistencia debiera ser mayor al caso en que ambas válvulas se encuentren más cerradas. Se recomienda estudiar más el comportamiento del Tornillo-50 ante el cerrado de una de sus válvulas, particularmente cuando se hayan cambiado recientemente los repuestos del equipo.

## 5.5. Conclusiones parciales

Se lograron obtener presupuestos de adquisición de equipos o instrumentos que permitirán la realización de los escenarios planteados en caso de que se decida implementar uno de estos.

Aunque el cambio fue leve en la posición del cabezal del Tornillo, su implementación permite sugerir mejoras posteriores. Para bajar el cabezal 20 milímetros es necesario cortar parte de los álabes del Tornillo, y en caso de tomar este camino, es necesario hacer pruebas en terreno con el fin de encontrar el punto óptimo de la abertura de válvula de caudal con la altura del cabezal. Por otro lado, en caso de no cortar la estructura, se mantendría el cabezal a 5 milímetros y se tendría que adquirir el del Tornillo 51, instalarlo y encontrar el punto óptimo de la abertura de válvula de caudal con la altura del nuevo cabezal, esto mediante pruebas en terreno.

Si bien el porcentaje de uso respecto a la corriente nominal es menor al 75 %, esto podría cambiar en caso de que se corte el álabe y se baje el cabezal, por lo que se sugiere que, en caso de seguir con este escenario, se examine el efecto del cabezal en la corriente en vacío y en servicio. Esto es porque se vio un aumento en el porcentaje respecto al nominal en comparación con el caso base sin cabezal, por lo que bajar más esta pieza aumentará la carga del motor y podría acelerar su deterioro. Sin embargo, si se mantuviera por debajo del 75 %, se podría ver la posibilidad de instalar un VDF para asegurar el funcionamiento óptimo del equipo ante variaciones en el caudal de entrada.

El cambio en la pérdida de fibra útil luego de la instalación del cabezal no sólo es apreciable cuantitativamente, sino que también cualitativo, ya que las telas de la Prensa no tenían deslices ni fugas de pasta por los costados a diferencia del caso anterior. La pérdida al partir línea, causada por la baja de consistencia en la caja de nivel, es posible disminuirla al minimizar las detenciones de línea por niveles altos o mejorar las condiciones de trabajo de la bomba intermedia entre los Tornillos estruajadores y la Prensa Doble Tela, lo que podría ser el enfoque de un futuro estudio de la línea.

Todo lo anterior permite concluir que el cambio sí fue favorecedor para el equipo y que el cabezal se dejará en uso, además de cotizar la misma pieza para el otro Tornillo.

Se recomienda para un futuro volver a estudiar el porcentaje de fibra útil del filtrado de los Tornillos y de la Prensa Doble Tela con el cabezal instalado en uno o ambos Tornillos. Esto para tener un valor más preciso de disminución de pérdida de fibra útil.

Se sugiere también examinar el comportamiento de los Tornillos para el análisis de sensibilidad ante un cerrado de las válvulas cuando se haya cambiado recientemente los repuestos o mediante la búsqueda de un modelo del comportamiento de los Tornillos, incluyendo estudios de diseño del piping de entrada, que podría ser distinto entre ambos. Junto con esto, se sugiere repetir el análisis con una receta de mayor porcentaje de reciclado, lo que permitirá ver más precisamente el efecto del cerrado de las válvulas al ser una fibra más densa; por otro lado, se podría cerrar un Tornillo y ver el filtrado de cada uno para definir cuál de ambos aporta más fibra al rechazo, logrando caracterizar las respuestas de ambos Tornillos ante cambios en el sistema.

En relación a la prueba del Espesador, a pesar de las discrepancias entre las mediciones en terreno y el balance de masa con flujos ideales, se observa que la variación de velocidad del equipo frente a cambios en la consistencia de entrada es una alternativa efectiva para reducir la pérdida de fibra útil, validando la propuesta del escenario de instalar un Lazo control en el Espesador. Se sugiere mejorar el proceso mediante la instalación de flujómetros en otros puntos de la línea; la primera ubicación corresponde a la salida de la bomba elevadora, así se podrán monitorear cambios en el flujo de salida, anticipar posibles problemas en el Colador CH-5 y supervisar el comportamiento del equipo. En segundo lugar, se recomienda instalar un instrumento en la entrada de la Bomba transportadora para cuantificar el flujo que ingresará a los Tornillos 50 y 51, permitiendo calcular el agua que sale del Espesador mediante un balance de masa.

Junto con lo anterior, se dejaron fijos valores en la ecuación que relaciona velocidad del Espesador con la consistencia de entrada (ver ecuación 4.2), esto ya que no considera cambios en la consistencia de salida del equipo, y se recomienda considerar esta consistencia como otra variable para encontrar valores más precisos de flujos máxicos de pérdida de fibra útil.

Lo obtenido en este objetivo permitirá definir la base para el análisis económico, en que se utilizarán los resultados en terreno como la consistencia a la que se llegará implementando el escenario, permitiendo cuantificar los beneficios de cada alternativa; mientras que las cotizaciones obtenidas definirán los costos asociados.

# Capítulo 6

## Análisis económico

Con el desempeño de los escenarios obtenido en la sección anterior es posible definir cuál será la consistencia del filtrado de su respectivo equipo luego de su implementación, lo que será utilizado para cuantificar el beneficio económico de la ejecución de la alternativa.

El contacto con proveedores permitió definir los costos directos asociados a la compra de sistemas de cada escenario y el costo operacional de sus repuestos y consumos; mientras que la comunicación con contratistas permitió definir costos indirectos como la desmantelación de maquinaria anterior y los servicios de puesta en marcha. Todo esto será utilizado para la cuantificación de la inversión inicial y de los gastos anuales para cada escenario.

La información recolectada tanto por pruebas de desempeño como por comunicación personal será utilizada para un análisis económico según se define a continuación.

### 6.1. Metodología

Se evaluarán necesidades económicas de cada uno de los escenarios propuestos considerando lo siguiente:

- **CAPEX:** Definido como una inversión fija y única necesaria para construir el proyecto, y considerará costo de adquisición de los equipos, costo de su instalación, costos asociados al piping y a la instalación eléctrica y costos de mejora del espacio de trabajo en caso de tener que modificar el terreno presente. Para el costo de envío asociado a los equipos, se utilizará el Capítulo 3 del libro *Review of Maritime Transport 2021* [42] suponiendo que se utiliza un contenedor de cuarenta pies y que la entrega es “gate-in gate-out”, es decir, incluye los costos asociados a transporte marítimo y posterior recepción terminal; pero no incluye gastos administrativos.

Cada uno de los costos asociados al total fijo aportará según un porcentaje, ya sea respecto del costo fijo total o respecto al costo de adquisición de equipos. Estos porcentajes fueron asignados según el libro *Plant design and economics for chemical engineers* [43] y por observación de proyectos en terreno; se presentarán las asignaciones porcentuales respecto al valor de los equipos y respecto al total del CAPEX. Para ello se utilizó la siguiente metodología:

1. Definir el porcentaje respecto al total del CAPEX corresponde al valor de adqui-

sición de los equipos. Con el fin de ejemplificar, supongamos que la compra de los equipos corresponde a un 40 % del valor total del CAPEX; este porcentaje, según bibliografía, debe estar entre 40 % – 55 %, y se asigna según la complejidad del Sistema a comprar.

2. Asignar los porcentajes respecto al valor de adquisición de los equipos. Nuevamente, supongamos que el Piping corresponde a 10 % de este valor.
  3. Transformar la asignación porcentual según adquisición de equipos a porcentaje respecto al valor total del CAPEX. Tomando el caso anterior, el Piping tendría un  $10 \% \cdot 40 \% = 4 \%$ .
  4. Repetir los dos pasos anteriores con todos los costos directos a considerar: Instalación, Instrumentación y Terreno.
  5. Una vez se tengan todas las asignaciones porcentuales anteriores respecto al valor total del CAPEX, se obtiene el porcentaje total sumando los ítems anteriores. Esto entregará el porcentaje de costos directos respecto al valor final.
  6. La asignación porcentual de Ingeniería, en los costos indirectos, está dada por un porcentaje entre 5 % – 30 % de los costos directos [43], lo cual se calculó anteriormente. Así, su porcentaje respecto al total del CAPEX será el porcentaje asignado multiplicado por el porcentaje de costos directos respecto al valor final.
  7. El valor de construcción y de contingencia se asignan arbitrariamente según las dimensiones del proyecto y los riesgos de instalación del escenario.
  8. Para verificar que la asignación porcentual sea correcta, se suma el porcentaje de los costos directos respecto al total del CAPEX con los porcentajes de ingeniería, construcción y contingencia. Si este total resulta en 100 %, se consideran correctos.
- **OPEX:** Costo anual necesario para la operación del escenario, considerando gastos de mantención, insumos como la electricidad y el agua que necesitan; y los repuestos según su vida útil.
  - **Beneficios:** Se considerará como un beneficio la suma del ahorro de costos asociado al tratamiento de la fibra útil y el ahorro del costo de oportunidad por la fibra que ya no se pierde. Cabe recordar que:

$$\%ahorro = \frac{M_{util,antes} - M_{util,despues}}{M_{util,antes}} \cdot 100 \%$$

Es decir, el ahorro estará dado por la cantidad de fibra que ya no se pierde en el rechazo de cada equipo estudiado. Este porcentaje de ahorro se utilizará para cuantificar los beneficios como sigue:

- Reducción por tratamiento de lodos (considerando lodos primarios y secundarios):

$$M \left[ \frac{ton_{\acute{u}til}}{dia} \right] \cdot \%ahorro \cdot \left( \%Lodo_{prim.} \cdot Costo_{prim.} \left[ \frac{USD}{ton} \right] + \%Lodo_{sec.} \cdot Costo_{sec.} \left[ \frac{USD}{ton} \right] \right)$$

- Venta de la fibra ahorrada:

$$\%ahorro \cdot M \left[ \frac{ton_{\acute{u}til}}{hr} \right] \cdot Precio_{ton,fibra} \left[ \frac{USD}{ton} \right] \cdot t_{op} \left[ \frac{hr}{a\tilde{no}} \right]$$

Con esto será posible definir un valor total de Costos = CAPEX + OPEX y el valor de Utilidades como la suma de ahorro de costos.

## 6.2. Resultados

### 6.2.1. Mejoras para el Espesador de Papel Viejo

#### Lazo control en el Espesador

Al tener un flujo volumétrico constante, se optó por un sensor magnético de consistencia, el cual detectará variaciones en la entrada y cambiará la velocidad según corresponda. Se utilizaron las siguientes ponderaciones para el CAPEX:

Tabla 6.1: Asignaciones porcentuales de costos directos del CAPEX para el Lazo control del Espesador. Elaboración propia.

Costos directos	Respecto a adquisición de equipos	Respecto a valor final de CAPEX	Justificación
Equipos	100 %	40 %	Esta alternativa se basa en la adquisición de sistemas.
Instalación	40 %	16 %	Se debe modificar una cañería existente.
Instrumentación	30 %	12 %	Costo de que se deje efectivo el lazo control.
Piping	20 %	8 %	Se modifica el piping existente.
Terreno	0 %	0 %	No se necesita modificar en terreno.

Tabla 6.2: Asignaciones porcentuales de costos indirectos del CAPEX para el Lazo control del Espesador. Elaboración propia.

Costos indirectos	Porcentaje	Respecto a valor final de CAPEX	Justificación
Ingeniería	20 %	15 %	Ingeniería para la instalación en la sala eléctrica.
Construcción y contratistas	0 %	0 %	No se necesitan obras civiles.
Contingencia	9 %	9 %	Instalación en altura.

Y por otro lado, se tienen los siguientes criterios para el OPEX:

Tabla 6.3: Costos variables considerados en el OPEX para el escenario de Lazo de control en el Espesador. Elaboración propia.

Costos variables	Unidad	Explicación
Consumo eléctrico	USD/año	Se necesita estar conectado a la energía eléctrica para su funcionamiento.
Mantenimiento	USD/año	20 % de los costos de consumibles.

Para el cálculo de utilidades, se supuso que se opera 14 horas al día los 365 días del año (5.110 horas de trabajo al año), y que el escenario bajará la consistencia a lo obtenido según los resultados de la sección anterior, es decir, a 0,06 % con un filtrado de caudal 42,17 Litros por segundo.

### 6.2.2. Mejoras para los Tornillos Estrujadores

#### Cabezales cónicos en el extremo de los tornillos

En este escenario se considera la adquisición del cabezal cónico para el Tornillo 51, el cual no tiene esta pieza. Se utilizaron las siguientes ponderaciones para el CAPEX:

Tabla 6.4: Asignaciones porcentuales de costos directos del CAPEX para el Cabezal cónico de los Tornillos. Elaboración propia.

Costos directos	Respecto a adquisición de equipos	Respecto a valor final de CAPEX	Justificación
Equipos	100 %	45 %	Esta alternativa se basa en la adquisición de sistemas.
Instalación	55 %	25 %	Se necesita detener la producción.
Instrumentación	0 %	0 %	No se necesitan controladores.
Piping	0 %	0 %	No se necesita piping.
Terreno	0 %	0 %	No se necesita modificar en terreno.

Tabla 6.5: Asignaciones porcentuales de costos indirectos del CAPEX para el Cabezal cónico de los Tornillos. Elaboración propia.

Costos indirectos	Porcentaje	Respecto a valor final de CAPEX	Justificación
Ingeniería	30 %	21 %	No tiene dimensiones superlativas, no necesita ingeniería extensa.
Construcción y contratistas	0 %	0 %	No se necesitan obras civiles.
Contingencia	9 %	9 %	Instalación en altura.

Y por otro lado, se tienen los siguientes criterios para el OPEX:

Tabla 6.6: Costos variables considerados en el OPEX para el escenario de Cabezales cónicos de los Tornillos. Elaboración propia.

Costos variables	Unidad	Explicación
Mantenimiento	USD/año	Se asigna un 5% del costo de adquisición del instrumento a la mantención de este.

Para el cálculo de utilidades se utilizaron los resultados de la prueba, llegando a una consistencia de filtrado de 0,6 % en los Tornillos (el cabezal nuevo baja la consistencia de filtrado un 0,15 % extra) y a una de 0,17 % en el filtrado de la Prensa Doble Tela. Se considera que trabaja los 365 días del año, es decir, el tiempo de operación es de 5.110 horas al año.

### Variador de velocidad en motor de Tornillos

Se considera la adquisición, cableado e instalación del variador de velocidad en este escenario según los siguientes porcentajes del CAPEX:

Tabla 6.7: Asignaciones porcentuales de costos directos del CAPEX para el Variador de Frecuencia en los Tornillos. Elaboración propia.

Costos directos	Respecto a adquisición de equipos	Respecto a valor final de CAPEX	Justificación
Equipos	100 %	40 %	Esta alternativa se basa en la adquisición de sistemas.
Instalación	40 %	16 %	Instalación del variador y del sistema asociado.
Instrumentación	25 %	10 %	Costo asociado a la unión al DCS.
Piping	0 %	0 %	No se necesita piping.
Terreno	0 %	0 %	No se necesita modificar en terreno.

Tabla 6.8: Asignaciones porcentuales de costos indirectos del CAPEX para el Variador de Frecuencia en los Tornillos. Elaboración propia.

Costos indirectos	Respecto a adquisición de equipos	Respecto a valor final de CAPEX	Justificación
Ingeniería	35 %	23 %	No tiene dimensiones superlativas, no necesita ingeniería extensa.
Construcción y contratistas	0 %	0 %	No se necesitan obras civiles.
Contingencia	11 %	11 %	Instalación de cableado.

Y por otro lado, se tienen los siguientes criterios para el OPEX:

Tabla 6.9: Costos variables considerados en el OPEX para el Variador de Frecuencia en los Tornillos. Elaboración propia.

Costos variables	Unidad	Explicación
Consumo de energía	USD/año	El variador necesita estar conectado a la corriente para que funcione.
Mantenimiento	USD/año	20% del costo de consumo de energía.

Para el cálculo de utilidades se supuso una consistencia final del promedio del rango establecido por estándar, es decir, promedio del 0,1 % – 0,4 %, lo que indica una consistencia final de 0,25 %, además de suponer que el caudal se mantiene constante respecto al caso base. También se consideraron 5.110 horas al año de uso.

### 6.2.3. Mejoras para la Prensa Doble Tela

#### Sistemas de regaderas

Se considera la compra de dos sistemas de regaderas de baja presión, oscilantes, con sistema de limpieza y con tubo deslizante; y la adquisición de uno de alta presión con las mismas características. Se utilizaron las siguientes ponderaciones para el CAPEX:

Tabla 6.10: Asignaciones porcentuales de costos directos del CAPEX para las regaderas de la Prensa. Elaboración propia.

Costos directos	Respecto a adquisición de equipos	Respecto a valor final de CAPEX	Justificación
Equipos	100%	40%	Esta alternativa se basa en la adquisición de sistemas.
Instalación	40%	16%	Instalación de los sistemas.
Instrumentación	15%	6%	Cableado asociado al panel de control.
Piping	30%	12%	Se necesita hacer nuevo piping para el agua de entrada a las regaderas.
Terreno	0%	0%	No se necesita modificar en terreno.

Tabla 6.11: Asignaciones porcentuales de costos indirectos del CAPEX para las regaderas de la Prensa. Elaboración propia.

Costos indirectos	Porcentaje	Respecto a valor final de CAPEX	Justificación
Ingeniería	15%	11%	No tiene dimensiones superlativas, no necesita ingeniería extensa.
Construcción y contratistas	0%	0%	No se necesitan obras civiles.
Contingencia	15%	15%	Instalación en altura.

Junto con ello, se consideró el costo por la disposición del sistema actual de regaderas de alta presión como un 5 % del costo total de desmantelación del equipo [44], esto debido a la relación de tamaños de las regaderas y la máquina. Por otro lado, se tienen los siguientes criterios para el OPEX:

Tabla 6.12: Costos variables considerados en el OPEX para las regaderas de la Prensa. Elaboración propia.

Costos variables	Unidad	Explicación
Consumo de energía	USD/año	Consumo de los motores de las regaderas.
Consumo de agua	USD/año	Se necesita agua para el lavado de las prensas.
Mantenimiento	USD/año	20% de gastos asociados a insumos.

Para el cálculo de utilidades se supuso una consistencia final del promedio de las mediciones anteriores (0,02 %) con la obtenida con el cabezal del Tornillo en uso (0,17 %), por lo que se

usó una consistencia final de 0,1 %. Se consideraron 1.825 horas al año de uso, por la operación de 5 horas diarias los 365 días del año, ya que se deben usar en régimen discontinuo.

## 6.2.4. Cambio a tecnología moderna

Para los casos de cambio a tecnología moderna, se suprimió la columna de “Porcentaje” en costos indirectos ya que se utilizaron las cotizaciones de los sistemas modernos para asignar los porcentajes a cada uno de los costos según el valor final del CAPEX.

### 6.2.4.1. Washer

Se le asignaron los siguientes porcentajes de costos al *Washer*:

Tabla 6.13: Asignaciones porcentuales de costos directos del CAPEX para la adquisición del Washer. Elaboración propia.

Costos directos	Respecto a adquisición de equipos	Respecto a valor final de CAPEX	Justificación
Equipos	100 %	35 %	Esta alternativa se basa en la adquisición de sistemas.
Instalación e Instrumentación	12 %	4 %	Nuevas instalaciones, pintura e instrumentación.
Piping	25 %	9 %	Piping nuevo.
Instalación eléctrica	12 %	4 %	Nueva instalación eléctrica.
Terreno	24 %	8 %	Desmantelación y adaptación de terreno existente.

Tabla 6.14: Asignaciones porcentuales de costos indirectos del CAPEX para la adquisición del Washer. Elaboración propia.

Costos indirectos	Respecto a valor final de CAPEX	Justificación
Construcción y contratistas	15 %	Es posible que se necesiten obras civiles.
Contingencia	10 %	Instalación en altura.
On-site services (externos)	14,5 %	Ingeniería y otros servicios entregados por el proveedor.

Tanto el valor porcentual de la instalación como de los servicios por externos fueron obtenidos por cotización [40], además se consideró también el costo por la disposición de la maquinaria existente [45] [46]. Por otro lado, se tienen los siguientes criterios para el OPEX:

Tabla 6.15: Costos variables considerados en el OPEX para la adquisición del Washer. Elaboración propia.

Costos variables	Unidad	Explicación
Consumo de energía	USD/año	Consumo de la nueva maquinaria.
Consumo de agua	USD/año	El equipo lava la pasta y utiliza grandes volúmenes de agua.
Repuestos	USD/año	Se debe cambiar la tela cada cuatro meses.
Mantenimiento	USD/año	20 % de gastos asociados a insumos.

Para el cálculo de utilidades se utilizó el valor dado por el balance de masa del proveedor para la consistencia del filtrado, al igual que el valor del porcentaje de fibra útil. Se tomó el mismo tiempo de operación que en los casos anteriores, 5.110 horas al año.

### 6.2.4.2. ScrewPress

La *ScrewPress* de los proveedores tiene el mismo principio de estruje, pero tiene mayores dimensiones en comparación al *Washer*. Se le atribuyen los siguientes porcentajes:

Tabla 6.16: Asignaciones porcentuales de costos directos del CAPEX para la adquisición de la ScrewPress. Elaboración propia.

Costos directos	Respecto a adquisición de equipos	Respecto a valor final de CAPEX	Justificación
Equipos	100 %	35 %	Esta alternativa se basa en la adquisición de sistemas.
Instalación e Instrumentación	21 %	7 %	Nuevas instalaciones, pintura e instrumentación.
Piping	25 %	9 %	Piping nuevo.
Instalación eléctrica	11 %	4 %	Nueva instalación eléctrica.
Terreno	5 %	2 %	Desmantelación y adaptación de terreno existente.

Tabla 6.17: Asignaciones porcentuales de costos indirectos del CAPEX para la adquisición de la ScrewPress. Elaboración propia.

Costos indirectos	Respecto a valor final de CAPEX	Justificación
Construcción y contratistas	15 %	Se necesitarán obras civiles.
Contingencia	5 %	Instalación en altura.
On-site services (externos)	28 %	Ingeniería y otros servicios entregados por el proveedor.

Tanto el valor porcentual de la instalación como de los servicios por externos fueron obtenidos por cotización [41], además se consideró también el costo por la disposición de la maquinaria existente [44]. Por otro lado, se tienen los siguientes criterios para el OPEX:

Tabla 6.18: Costos variables considerados en el OPEX para la adquisición de la ScrewPress. Elaboración propia.

Costos variables	Unidad	Explicación
Consumo de energía	USD/año	Consumo de la nueva maquinaria.
Repuestos	USD/año	Se deben cambiar las piezas cada dos años.
Mantenimiento	USD/año	20 % de gastos asociados a insumos.

Para el cálculo de utilidades se utilizó el valor dado por el balance de masa del proveedor para la consistencia del filtrado, al igual que el valor del porcentaje de fibra útil. Se tomó el mismo tiempo de operación que en los casos anteriores, 5.110 horas al año. Se examinaron dos casos de trabajo: el filtrado en el caso base de la Prensa Doble Tela y el caso luego de la implementación del cabezal cónico en el Tornillo-50. Se profundiza en las nuevas condiciones a continuación.

### 6.2.4.3. ScrewPress con cabezal en Tornillo

Se desea explorar los beneficios de este escenario ante los cambios ya realizados en el equipo alejano de estudio. A continuación se presenta una tabla comparativa con las condiciones de trabajo de la Prensa Doble Tela en su condición base versus con el cabezal instalado en uno de los Tornillos.

Tabla 6.19: Variación de parámetros de trabajo en Prensa Doble Tela antes y después de la implementación del cabezal en el Tornillo-50. Elaboración propia.

Condición		Base	Cabezal instalado
Flujo de filtrado	$\frac{L}{s}$	22,63	19,775
%Consistencia de filtrado	$\frac{kg_{fibra}}{kg_{total}}$	0,8 %	0,17 %

Se mantienen las asignaciones porcentuales para el caso anterior. Estos cambios de parámetros de trabajo se verán reflejados en la percepción de beneficios que tendrá el escenario.

## 6.2.5. Asignaciones porcentuales

Lo explicado en las secciones anteriores se puede resumir en la siguiente tabla:

Tabla 6.20: Asignaciones porcentuales para el CAPEX para cada escenario considerando costos directos e indirectos. Elaboración propia.

%Respecto a CAPEX	Lazo Espesador	Cabezal Tornillos	VDF en Tornillos	Regaderas Prensa	Cambio a Washer	Cambio a ScrewPress
Equipos	40%	45%	40%	40%	35%	35%
Instalación	16%	25%	16%	16%	6%	10%
Instrumentación	12%	0%	10%	6%	2%	1%
Piping	8%	0%	0%	12%	9%	9%
Terreno	0%	0%	0%	0%	8%	2%
Ingeniería	15%	21%	23%	11%	0%	0%
Construcción y contratistas	0%	0%	0%	0%	15%	10%
Contingencia	9%	9%	11%	15%	10%	5%
On-site services (ext.)	0%	0%	0%	0%	15%	28%
<b>Total</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>

## 6.2.6. VAN

Se evaluó en un horizonte de diez años, con un 27% de impuesto. Con el fin de mantener la confidencialidad con la empresa, se normalizaron los valores del VAN y la Inversión inicial por un factor decidido por criterio interno. Esto resultó en:

Tabla 6.21: Comparación de Inversión inicial, VAN y TIR para cada escenario. Elaboración propia.

Escenario	Inversión inicial [USD]	VAN [kUSD]	TIR
Lazo control en el Espesador	5,3	0,9	534,2%
Compra de cabezal cónico restante	1	3,8	10.582,1%
Instalación de un variador de frecuencia en Tornillos	2,3	1	1.220,9%
Sistemas de regadío para la Prensa Doble Tela	18,7	0,9	150,1%
Cambio a tecnología moderna ( <i>Washer</i> )	149,3	3,8	91,1%
Cambio a tecnología moderna ( <i>ScrewPress</i> ) en caso base	58,6	1,9	110,7%
Cambio a tecnología moderna ( <i>ScrewPress</i> ) con cabezales instalados	58,6	-0,7	0%

### 6.3. Discusiones parciales

Los porcentajes de ahorro de fibra útil para escenarios que no pudieron ser sometidos a pruebas físicas son muy especulativos y se basan en supuestos por medidas anteriores o medidas de estándar, haciéndolo una limitación importante en esos casos. Esto puede distar mucho del caso real, especialmente en el caso del cambio a nueva tecnología, esto debido a que la operación de un equipo dependerá de los flujos de entrada y de su correcta instalación, por lo que los valores asociados a ahorro de fibra útil podrían ser menores a los utilizados, lo que causaría que se necesitara más tiempo para recuperar la inversión en caso de cambiar a tecnología moderna.

Para el caso de la instalación de VDF, se supuso que esta modificación entregaría una consistencia de filtrado de 0,25 %, el valor promedio del filtrado establecido por centerline; pero según lo obtenido en la prueba del Lazo control para el Espesador, este valor podría ser mucho menor (menor a 0,1 %), por lo que el escenario tendría un mayor VAN y una mayor TIR. De forma análoga, para el caso del Sistema de Regaderas en la Prensa Doble Tela, se supuso un promedio entre la condición con el cabezal instalado (0,17 %) y la condición ideal según trabajo anterior (0,02 %), pero nuevamente, este valor podría ser menor y por ende tendría un mayor VAN y una mayor TIR.

Cabe destacar que para el escenario de reemplazo por la Prensa Doble Tela por una Screw-Press, se utilizó el caso base como punto de comparación, en que la consistencia promedio correspondía a 0,8 %; si se utilizan los parámetros de trabajo obtenidos luego de la instalación del cabezal cónico en los Tornillos, el proyecto deja de presentar beneficios y por ende deja de ser rentable, por lo que se seguirá inspeccionando únicamente el caso con los parámetros base.

Puede existir también un beneficio asociado al uso de energía de equipos que tratan los lodos generados por el proceso, esto ya que al disminuir la fibra útil en los rechazos, disminuye también la carga en los equipos de tratamiento de lodos, por lo que disminuye la potencia aplicada. Sin embargo, esto no se encuentra en el alcance del trabajo, y se le atribuye la mayor parte del beneficio a la disminución másica de la pérdida de fibra.

Para el cálculo de beneficios respecto al ahorro de fibra en los rechazos se supuso que el porcentaje de fibra útil en estas corrientes se mantenía constante. Esto tiene efecto en los valores numéricos de las utilidades percibidas, pero como fue dicho en el objetivo anterior, los equipos son de la fase de dispersión y no de depuración, por lo que sus rechazos tendrán baja composición de finos y los cambios que se puedan percibir no serían significativos respecto a las medidas tomadas anteriormente; esto ya que en dispersión no se limpia la pasta de entrada, sino que se espesa al aumentar su consistencia.

Por otro lado, se utilizó un supuesto fuerte para el caso de los Variadores de frecuencia en los Tornillos, estableciendo que no hay cambios en el flujo volumétrico de salida, es decir, no aumentan la cantidad de agua extraída sino que varían la cantidad de fibra que sale por esta, disminuyéndola en los rechazos para que aumente en los aceptados. Al no poder variar la velocidad de los Tornillos, se debe tomar este supuesto, aunque se ha visto que con pequeños cambios como la instalación de un cabezal cónico sí existe un cambio en el caudal, por lo que los beneficios percibidos por el escenario pueden variar.

Cabe destacar que los valores de venta de una tonelada de fibra y de tratamiento de lodos utilizados en el presente trabajo no son constantes a largo plazo, esto debido a las exigencias ambientales que se hacen más estrictas con el tiempo, por lo que el tratamiento de lodos podría aumentar su valor; así mismo, podría aumentar el precio de venta de tonelada de fibra por un surgimiento de nuevas tecnologías de procesamiento o de un byproduct novedoso para venta a otras empresas, aumentando la demanda por fibra. Esto afectaría la percepción de ganancias del proyecto en cuanto a tasa de retorno y VAN.

Los porcentajes asignados a cada uno de los costos directos e indirectos son basados en proyectos similares, por lo que en la implementación, el costo especulado podría ser mayor en los peores casos, pero también podría estar sobredimensionado; esto ya que, aunque los proyectos tengan similitudes, sus puestas en terreno variarán debido a las diferencias en el área de instalación, las cañerías a cortar e instalar, etcétera.

Los costos fueron obtenidos mediante cotizaciones para el año 2023, las cuales tienen cierto periodo de vigencia, esto debido a que puede variar el costo de los insumos, de fabricación o de transporte, por lo que se deben verificar las cotizaciones cuando se deseen implementar los escenarios. La inversión inicial necesaria obtenida en el presente estudio es una respuesta sólida, pero se debe reconocer que existe un grado de incertidumbre económica debido a las fluctuaciones de precios tanto por el valor de los insumos insumos como debido a la inflación.

## 6.4. Conclusiones parciales

Se cumplió el objetivo de cuantificar costos y utilidades según ahorro de fibra útil, logrando obtener el Valor Actual Neto y la Tasa Interna de Retorno para cada escenario.

Hay un beneficio no medible asociado al ahorro de fibra que corresponde al lineamiento con la política cero residuos de Softys y el adherirse más a las leyes de responsabilidad extendida del productor, en que no sólo se emiten menos residuos sino que también facilita el tratamiento de los mismos al ser un menor volumen. Esta menor emisión de lodos permitirá también adaptarse a futuras legislaciones y normas ambientales que dicten límites más estrictos de residuos de empresas.

Se recomienda estudiar el beneficio asociado al ahorro de energía al disminuir la carga en el equipo que procesa los lodos de la línea con el fin de tener un valor de beneficios percibidos más preciso; y con este mismo fin se recomienda tomar mediciones de porcentaje de fibra útil en los filtrados de los Tornillos y de la Prensa Doble Tela cuando el cabezal esté en uso, de este modo se obtendría cuánta fibra útil exacta está saliendo por los filtrados.

Sólo viendo los beneficios económicos se puede concluir que la alternativa con mayor preferencia de implementación corresponde a la adquisición del cabezal cónico restante para el segundo Tornillo estrujador, esto porque tiene la mayor TIR de todas las alternativas, es decir, tiene una mayor rentabilidad, lo que la consolida como la mejor elección en términos económicos. Su alto valor, de más de diez mil por ciento, es debido a que es un proyecto de baja inversión (mínima en comparación con las otras alternativas) y que ahorra una cantidad significativa de fibra en dos equipos que tienen una alta pérdida en sus rechazos en su

funcionamiento normal.

Cabe destacar que toda conclusión obtenida de la rentabilidad y aplicabilidad de cada alternativa podría cambiar con el análisis cualitativo de la siguiente sección, es decir, la alternativa que parece la mejor a implementar a partir de los resultados del análisis económico, podría no ser la mejor debido a que es difícil de operar o debido a que produce más emisiones de gases de efecto invernadero. Eso se analizará en el siguiente capítulo.

# Capítulo 7

## Comparación

En el capítulo anterior se obtuvo tanto el VAN como la TIR para cada uno de los seis escenarios (Lazo control en el Espesador, Cabezal cónico en un Tornillo, Variador de Frecuencia para ambos Tornillos, Sistemas de regaderas para la Prensa, Reemplazo por un *Washer*, Reemplazo por una *Screwpress*); resaltando la adquisición de un cabezal cónico para el Tornillo 51 como la alternativa más favorable al tener el mayor VAN, la mayor TIR y la menor inversión inicial. Esto debido a que la instalación del cabezal en uno de los Tornillos disminuyó la consistencia del filtrado de los Tornillos y de la Prensa Doble Tela, generando un VAN 50 % mayor que la alternativa en segundo lugar y una TIR diez veces mayor que la del escenario que le sigue.

Sin embargo, este resultado podría implicar perjuicios ambientales o ser complejo de operar, por lo que en esta sección se contemplan estos criterios para terminar de caracterizar a las alternativas, asignándoles un puntaje que permitirá discernir cuál escenario es el mejor a implementar. La metodología de este análisis se detalla a continuación.

### 7.1. Metodología

Se seleccionará la alternativa que tenga mejor proyección económica, ambiental y operativa; para lo cual se realizará un análisis multicriterio que considere todos estos ámbitos, entregándole una ponderación de relevancia a cada criterio: beneficio económico, mantenibilidad, operatividad y beneficio ambiental. Se asignará puntaje del 1 al 7, en que 1 es el puntaje más bajo y 7 el más alto.

En primer lugar, se hará un cociente de costo-beneficio llamado *Ratio*, esto ya que la alternativa de menor costo no será necesariamente la mejor, puesto que podría no tener un beneficio significativo a comparación de otros escenarios; se espera encontrar un escenario que minimice los costos y maximice los beneficios, por lo que se asignará mayor puntaje a la alternativa que tenga un mayor *Ratio* económico y un mayor *Ratio* ambiental. Estos estarán dados por:

$$Ratio_{económico} = \frac{Beneficio[kUSD]}{Costo[kUSD]} \quad (7.1)$$

$$Ratio_{ambiental} = \frac{Beneficio[kgCO_2eqahorrados]}{Costo[kUSD]} \quad (7.2)$$

En que el beneficio y el costo económico se encuentran en miles de dólares, y las emisiones de  $\text{kgCO}_2\text{eq}$  ahorradas será la diferencia entre las emisiones antes de la implementación de la alternativa y las emisiones después de que el escenario se haga efectivo. Se le dará un puntaje 7 al escenario que tenga mejor Ratio, un 6 al segundo mejor, y así sucesivamente hasta llegar al mínimo.

Se definen las siguientes calificaciones cualitativas para el análisis multicriterio:

- **Mantenibilidad:** Qué tan complejo es mantener la condición del escenario, considerando repuestos críticos, accesos, apoyo de terceros, programación y cantidad de piezas que tiene la alternativa.
- **Operatividad:** Considera la facilidad o complejidad de la operación del escenario, es decir, si es sencillo de utilizar o si es necesario capacitar para que el personal trabaje con la alternativa analizada.

Por último, se hará un set de pasos a seguir para la alternativa escogida, aclarando con quiénes se debe contactar y qué se puede hacer para implementar la alternativa.

## 7.2. Resultados

### 7.2.1. Ratio económico

Con los resultados del Análisis Económico, se calcula el Ratio como:

$$\text{Ratio} = \frac{VAN[kUSD]}{Inversión_{inicial}[kUSD]}$$

Visto en una tabla:

Tabla 7.1: Valor de ratio económico para cada escenario. Elaboración propia.

Escenario	Ratio $\frac{kUSD}{kUSD}$
Lazo control en Espesador	169,81
Cabezal Cónico en Tornillo	3.800
VDF en Tornillos	434,78
Sistema de regadío en Prensa Doble Tela	48,13
Cambio a tecnología moderna ( <i>Washer</i> )	25,45
Cambio a tecnología moderna ( <i>Screwpress</i> )	32,42

Lo que permite asignarles el siguiente puntaje al buscar que el Ratio sea máximo:

Tabla 7.2: Puntaje a cada escenario según su ratio económico en escala del 1–7. Elaboración propia.

Escenario	Puntaje
Lazo control en Espesador	5
Cabezal Cónico en Tornillo	7
VDF en Tornillos	6
Sistema de regadío en Prensa Doble Tela	4
Cambio a tecnología moderna ( <i>Washer</i> )	2
Cambio a tecnología moderna ( <i>Screwpress</i> )	3

### 7.2.2. Mantenibilidad

La mantenibilidad indica la facilidad de mantener el equipo en funcionamiento, considerando la facilidad de instalación y obtención de repuestos críticos, la necesidad de apoyo de terceros y su dependencia de un código de programación.

Este criterio no se puede evaluar cuantitativamente, por lo que se establece la siguiente métrica:

- Mucha dependencia de externos y muchos componentes → 1
- Leve dependencia de externos → 2
- Supervisión externa → 3
- Cantidad intermedia de componentes a mantener → 4
- Necesidad de capacitación → 5
- Mantenimiento periódico autónoma o pocos componentes a mantener → 6
- Completamente autónomo o con máximo dos componentes a mantener → 7

Examinamos uno a uno los escenarios:

- **Lazo control en el Espesador:** Al ser un controlador, cualquier fallo o descalibración necesita la intervención de alguien del área de electrocontrol. Junto con esto, su instalación necesita el apoyo de externos, y en caso de necesitar reemplazo total del medidor de consistencia, también se necesita personal del proveedor del instrumento y detención de línea. A pesar de que su descalibración y su reemplazo necesitan personal externo, cuenta con un único componente, lo que le da un puntaje intermedio de 4.
- **Cabezal cónico en extremo de Tornillo 51:** Es una pieza de fácil instalación y adaptabilidad a la maquinaria, además de que el equipo de mantenimiento de la Planta ya ha modificado estas piezas de otros Tornillos de Arquímedes. Sin embargo, su instalación requiere detención de línea, al igual que sus modificaciones en terreno, dándole una puntuación de 6.
- **Variador de Frecuencia en los Tornillos:** Tanto la instalación como el cableado requieren personal del área de electrocontrol, pero no se depende de personal de proveedores en caso de fallo total o parcial del instrumento, pero sí se debe detener línea

si fuera el caso. Además, cuenta con el instrumento, el cableado y el DCS, siendo un escenario de pocos componentes y clasificándose con una puntuación de 4.

- **Sistemas de regaderas en Prensa Doble Tela:** Las regaderas cuentan con un sistema de limpieza externo que puede ser accionado por una válvula, además de contar con una doble camisa que permite sacar la tubería sin detener el funcionamiento de la máquina. La instalación de este tipo de sistemas también ha sido realizado anteriormente por el equipo de mantención, por lo que la instalación de repuestos tampoco depende de externos, sin embargo, cuenta con más de dos componentes a mantener (el tablero de control, la tubería de regaderas y las escobillas), lo que asigna un puntaje de 6.
- **Adquisición de tecnología de reemplazo *Washer*:** La instalación de un nuevo equipo requiere apoyo de externos, al igual que el reemplazo de partes críticas. Este escenario tiene mucha dependencia de externos y muchos componentes, siendo estos las telas, las duchas y los rodillos por nombrar a unos pocos.
- **Adquisición de *Screwpress*:** Análogo al caso del Washer, este escenario requiere apoyo de externos para su instalación; sin embargo, tiene una cantidad menor de componentes, destacándose sólo el Tornillo principal y los cuatro cestos que lo componen.

En base a esto se les asigna el siguiente puntaje a cada alternativa:

Tabla 7.3: Puntaje a cada escenario según su facilidad de mantención en escala de 1–7. Elaboración propia.

Escenario	Puntaje
Lazo control en Espesador	4
Cabezal Cónico en Tornillo	6
VDF en Tornillos	4
Sistema de regadío en Prensa Doble Tela	6
Cambio a tecnología moderna ( <i>Washer</i> )	1
Cambio a tecnología moderna ( <i>Screwpress</i> )	2

### 7.2.3. Operatividad

La operatividad indica la facilidad de operación de un escenario, es decir, es un indicador de la complejidad de uso del escenario considerando tanto equipos como sistemas de control. Esto significa que mientras más alta la puntuación en operatividad, más simple es para los operadores utilizar el escenario.

Al igual que el caso de la mantenibilidad, no se puede evaluar cuantitativamente, por lo que se repite la misma métrica anterior en que:

- Muy complejo de operar → 1
- Complejo de operar → 2
- Complejo de aprender → 3
- Indiferente → 4
- Simple de aprender → 5
- Sencillo de supervisar → 6
- Simple de utilizar → 7

Examinamos cada uno de los escenarios:

- **Lazo control en Espesador:** Este escenario es sencillo de utilizar, puesto que luego de su instalación funciona de forma autónoma, otorgándole el puntaje máximo.
- **Cabezal cónico en el extremo de Tornillo 51:** Una vez instalado, el cabezal no necesita monitoreos ni mantenciones estrictas, por lo que es una alternativa simple de utilizar.
- **Variador de Frecuencia en los Tornillos:** Al igual que el caso del controlador del Espesador, funciona por su cuenta luego de su instalación, sin necesitar intervención de operadores.
- **Sistemas de regaderas en Prensa Doble Tela:** Las regaderas oscilatorias se sincronizan automáticamente con la velocidad de la Prensa, además de tener un panel de control de rápido acceso; sin embargo, este instrumento necesita una capacitación para su correcto uso y manejo, por lo que la alternativa es simple de aprender.
- **Adquisición de tecnología de reemplazo *Washer*:** Al ser un equipo nuevo se necesita capacitar intensivamente a los operadores y que sean supervisados para que la maquinaria nueva cumpla su función correctamente. Este escenario es muy complejo de operar.
- **Adquisición de *Screwpress*:** Se necesita capacitar intensivamente a los operadores y que sean supervisados para que el equipo funcione correctamente. Este escenario es muy complejo de operar.

Con lo anterior se obtiene la siguiente tabla de puntajes:

Tabla 7.4: Puntaje a cada escenario según su facilidad de operación en escala de 1–7. Elaboración propia.

Escenario	Puntaje
Lazo control en Espesador	7
Cabezal cónico en Tornillo	7
VDF en Tornillos	7
Sistema de regadío en Prensa Doble Tela	5
Cambio a tecnología moderna ( <i>Washer</i> )	1
Cambio a tecnología moderna ( <i>Screwpress</i> )	1

## 7.2.4. Efecto medioambiental

Para cuantificar los impactos ambientales se utilizó la categoría Potencial de Calentamiento Global, en que se representarán las emisiones de residuos y consumos de electricidad y agua mediante la unidad  $\text{kgCO}_2\text{eq}$ . Para ello, se utiliza la siguiente expresión:

$$Emisión_i = F_i \left[ \frac{Unidad}{año} \right] \cdot f_i \left[ \frac{\text{kgCO}_2\text{eq}}{Unidad} \right] \quad (7.3)$$

En que la Unidad puede ser másica, volumétrica o de energía dependiendo del flujo a analizar. Se utilizaron los siguientes factores de equivalencia:

Tabla 7.5: Factores de emisión para las variables analizadas. Elaboración propia.

Parámetro	Factor	Unidad
Disposición de lodos de Pasta	43,75 [47]	$\text{kgCO}_2\text{eq}/\text{ton}_{util}$
Consumo de electricidad	300,6 [48]	$\text{kgCO}_2\text{eq}/\text{MWh}$
Consumo de agua	0,405 [49]	$\text{kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^3$

La memoria de cálculo para el factor de disposición de pasta se encuentra en el Anexo G, mientras que el factor de consumo de agua, en el Anexo H; además de que para el factor de electricidad se usó el promedio anual de factor de emisión del 2022 según Energía Abierta. Las emisiones según cada parámetro se presentan a continuación:

$$E_{lodos} = (1 - \%Ahorro) \cdot 43,75 \left[ \frac{\text{kgCO}_2\text{eq}}{\text{ton}_{util}} \right] \cdot M_{util} \left[ \frac{\text{ton}_{util}}{\text{hr}} \right] \cdot t_{op} \left[ \frac{\text{hr}}{\text{año}} \right]$$

$$E_{electricidad} = P_{total}[\text{MW}] \cdot 300,6 \left[ \frac{\text{kgCO}_2\text{eq}}{\text{MWh}} \right] \cdot t_{op} \left[ \frac{\text{hr}}{\text{año}} \right]$$

$$E_w = F_w \left[ \frac{L}{min} \right] \cdot 60 \left[ \frac{min}{hr} \right] \cdot t_{op} \left[ \frac{\text{hr}}{\text{año}} \right] \cdot 0,405 \left[ \frac{\text{kgCO}_2\text{eq}}{\text{m}^3} \right] \cdot \frac{1[\text{m}^3]}{1000[L]}$$

El impacto ambiental de la implementación del escenario será el cambio en emisiones respecto al caso sin él, es decir, lo que se tiene en la actualidad. Se obtienen los siguientes ratios para cada escenario:

Tabla 7.6: Ratio ambiental que compara ahorro de emisiones versus el costo del escenario en miles de dólares. Elaboración propia.

Escenario	Ratio $\left[ \frac{\text{kgCO}_2\text{eq}}{\text{kUSD}} \right]$
Lazo control en Espesador	603,09
Cabezal Cónico en Tornillo	18.240,20
VDF en Tornillos	3.713,95
Sistema de regadío en Prensa Doble Tela	754,48
Cambio a tecnología moderna ( <i>Washer</i> )	2.384,09
Cambio a tecnología moderna ( <i>Screwpress</i> )	72,2

La memoria de cálculo para la obtención del Ratio Ambiental se encuentra en el Anexo I. Esta tabla se puede reescribir con el principio de que se busca maximizar este ratio:

Tabla 7.7: Ratio ambiental en puntaje del 1 al 7. Elaboración propia.

Escenario	Puntaje
Lazo control en Espesador	3
Cabezal cónico en Tornillo	7
VDF en Tornillos	6
Sistema de regadío en Prensa Doble Tela	4
Cambio a tecnología moderna ( <i>Washer</i> )	5
Cambio a tecnología moderna ( <i>Screwpress</i> )	2

### 7.2.5. Análisis Multicriterio

Se le asignan los siguientes porcentajes de ponderación según importancia:

Tabla 7.8: Porcentaje de criterios para el análisis multicriterio. Elaboración propia.

Criterio	Ponderación
Ratio económico	25 %
Mantenibilidad	25 %
Operatividad	25 %
Efecto medioambiental	25 %

En que para cada criterio se utilizará:

$$Puntaje_{criterio} = Puntaje_{1-7} \cdot \%Ponderación$$

Y el puntaje será:

$$Puntaje_{escenario} = \Sigma Puntaje_{criterio,escenario}$$

Esto permite obtener:

Tabla 7.9: Análisis multicriterio con puntuaciones asignadas. Elaboración propia.

Alternativa	Ratio	Ratio ambiental	Mantenibilidad	Operatividad	Suma
Lazo control en Espesador	1,25	0,75	1	1,75	<b>4,75</b>
Cabezal en Tornillo 51	1,75	1,75	1,5	1,75	<b>6,75</b>
VDF en Tornillo	1,5	1,5	1	1,75	<b>5,75</b>
Regaderas en Prensa	1	1	1,5	1,25	<b>4,75</b>
Cambio a Washer	0,5	1,25	0,25	0,25	<b>2,25</b>
Cambio a Screwpress	0,75	0,5	0,5	0,25	<b>2</b>

### 7.2.5.1. Análisis de Sensibilidad

Se verificará el efecto del cambio en asignaciones porcentuales de cada criterio en la puntuación final de los escenarios, para lo cual se aumentará más de tres veces un criterio mientras que los otros disminuyen.

#### Prioridad a beneficio económico

En caso de que se le otorgue prioridad al Ratio económico, existirá un cambio de orden desde el segundo lugar de puntaje, manteniendo el escenario de Instalación de un Cabezal cónico en el Tornillo 51 como el máximo puntuado. La nueva asignación de criterios y el efecto en los puntajes se ve a continuación:

Tabla 7.10: Asignación porcentual de criterios cuando se le da prioridad al beneficio económico. Elaboración propia.

Criterio	Ponderación
Ratio	85 %
Mantenibilidad	5 %
Operatividad	5 %
Efecto ambiental	5 %

Tabla 7.11: Puntajes de cada escenario y su variación respecto a su posición original al priorizar el beneficio económico. Elaboración propia

Alternativa	Suma	Variación de posición
Cabezal en Tornillo 51	6,95	0
VDF en Tornillo	5,95	0
Lazo control en Espesador	4,95	↑ 1
Regaderas en Prensa	4,15	↓ 1
Cambio a Screwpress	2,8	↑ 1
Cambio a Washer	2,05	↓ 1

#### Prioridad a la Mantenibilidad

El enfoque a la mantenibilidad puede darse debido a dificultades de terreno, condiciones adversas de instalación o falta de personal en el área de trabajo, por lo que se dará prioridad a proyectos que sean sencillos de mantener. Nuevamente, la alternativa de puntaje máximo se mantiene en su posición, mientras que las otras alternativas cambian según la siguiente asignación porcentual:

Tabla 7.12: Asignación porcentual de criterios cuando se le da prioridad a la mantenibilidad. Elaboración propia.

<b>Criterio</b>	<b>Ponderación</b>
Ratio	5 %
Mantenibilidad	85 %
Operatividad	5 %
Efecto ambiental	5 %

Tabla 7.13: Puntajes de cada escenario y su variación respecto a su posición original al priorizar la mantenibilidad. Elaboración propia

<b>Alternativa</b>	<b>Suma</b>	<b>Variación de posición</b>
Cabezal en Tornillo 51	6,15	<b>0</b>
Regaderas en Prensa	5,75	↑ 1
VDF en Tornillo	4,35	↓ 1
Lazo control en Espesador	4,15	<b>0</b>
Cambio a Screwpress	2	↑ 1
Cambio a Washer	1,25	↓ 1

### **Prioridad a la Operatividad**

La operatividad puede ser prioridad en caso de que se deba hacer un cambio urgente de la maquinaria y que, debido a la necesidad de renaudar la línea lo antes posible, sea lo más intuitivo de operar, por lo que se le dará preferencia a escenarios con mayor puntaje en este criterio. En este caso, ambos escenarios relacionados con los Tornillos estrujadores mantienen sus posiciones originales. La nueva asignación porcentual de los criterios y su efecto en los puntajes se ve a continuación:

Tabla 7.14: Asignación porcentual de criterios cuando se le da prioridad a la operatividad. Elaboración propia.

<b>Criterio</b>	<b>Ponderación</b>
Ratio	5 %
Mantenibilidad	5 %
Operatividad	85 %
Efecto ambiental	5 %

Tabla 7.15: Puntajes de cada escenario y su variación respecto a su posición original al priorizar la operatividad. Elaboración propia

Alternativa	Suma	Variación de posición
Cabezal en Tornillo 51	6,95	0
VDF en Tornillo	6,75	0
Lazo control en Espesador	6,55	↑ 1
Regaderas en Prensa	4,95	↓ 1
Cambio a Washer	1,25	0
Cambio a Screwpress	1,2	0

### Misma prioridad en ambos criterios cualitativos

En caso de que se desee un enfoque íntegro de las alternativas según su interacción con los operadores, se dará el mismo porcentaje a los criterios cualitativos. Ambos escenarios relacionados con los Tornillos estrujadores mantienen sus posiciones originales. Las asignaciones porcentuales de cada criterio según el enfoque propuesto y su efecto en los puntajes de los escenarios se presenta a continuación:

Tabla 7.16: Asignación porcentual de criterios cuando se le da prioridad equitativa a los criterios cualitativos. Elaboración propia.

Criterio	Ponderación
Ratio	5 %
Mantenibilidad	45 %
Operatividad	45 %
Efecto ambiental	5 %

Tabla 7.17: Puntajes de cada escenario y su variación respecto a su posición original al priorizar mantenibilidad y operatividad. Elaboración propia

Alternativa	Suma	Variación de posición
Cabezal en Tornillo 51	6,55	0
VDF en Tornillo	5,55	0
Lazo control en Espesador	5,35	↑ 1
Regaderas en Prensa	5,35	↓ 1
Cambio a Washer	1,25	0
Cambio a Screwpress	1,6	0

### Prioridad a beneficios ambientales

Si se establece como prioridad aquella alternativa que entrega el mayor ahorro de emisiones respecto a su costo de implementación, nuevamente se mantienen en su posición original los escenarios relacionados con los Tornillos estrujadores. Se presenta la nueva asignación porcentual de los criterios y sus efectos en los puntajes de las alternativas:

Tabla 7.18: Asignación porcentual de criterios cuando se le da prioridad al beneficio ambiental. Elaboración propia.

Criterio	Ponderación
Ratio	5 %
Mantenibilidad	5 %
Operatividad	5 %
Efecto ambiental	85 %

Tabla 7.19: Puntajes de cada escenario y su variación respecto a su posición original al priorizar el beneficio ambiental. Elaboración propia

Alternativa	Suma	Variación de posición
Cabezal en Tornillo 51	6,95	<b>0</b>
VDF en Tornillo	5,95	<b>0</b>
Cambio a Washer	4,45	↑ 2
Regaderas en Prensa	4,15	↓ 1
Lazo control en Espesador	3,35	↓ 1
Cambio a Screwpress	2	<b>0</b>

Todo este análisis permite ver que la mejor alternativa, en todos los casos, es instalar el Cabezal en el Tornillo 51.

### 7.3. Discusiones parciales

El factor asociado a la disposición de residuos de pasta fue obtenido a partir de un análisis de ciclo de vida a una receta de mayor gramaje que la que se estudia en el presente trabajo [47]. Se especula que el factor de emisiones para la receta trabajada es menor debido a su menor requerimiento de fibra. Por otro lado, el factor asociado a disposición de agua se obtuvo de un análisis de ciclo de vida realizado a una planta de potabilización de agua, para lo cual no se consideró la purificación y el uso de lodos activados para el cálculo del factor de emisiones; se recomienda estudiar el factor de tratamiento de agua particular para Softys.

Respecto a los criterios cualitativos (mantenibilidad y operatividad), estos tienen una calificación subjetiva según lo visto en terreno y, en caso de escenarios de reemplazo de equipo, promesas de proveedores. Esto significa que algunos escenarios podrían ser menos complejos de lo que se propone. Junto con estos criterios cualitativos, se sugiere añadir al análisis multicriterio el grado de automaticidad de cada escenario, ya que un mayor grado de automatización debería traducirse en un monitoreo más efectivo de las variables de interés y en respuestas más precisas del Sistema frente a variaciones en el entorno, por lo que se tendrían que modificar los estándares de trabajo, es decir, debido a que la automatización entrega una respuesta más precisa, los rangos de trabajo establecidos por centerline tendrán que ser modificados.

Los porcentajes de los criterios utilizados en el análisis pueden variar en futuras iteracio-

nes de este tipo de estudio, ya que la empresa puede cambiar sus prioridades con el paso del tiempo y, por ende, asignándole más o menos relevancia a cada ponderación porcentual.

La solución de mayor rentabilidad y ganancia es la de instalar el cabezal cónico restante al Tornillo 51, y por otro lado, la que entrega menos beneficios y utilidades corresponde al cambio de los Tornillos y el Espesador por un *Washer*. Esto último no significa que sea un mal escenario, sólo que no genera tantos beneficios en comparación a soluciones más sencillas y de menor tiempo de implementación. Se especula que las alternativas de reemplazo serán rentables en un futuro, cuando las soluciones ya sugeridas no sean suficientes para enfrentar la problemática de fibra útil en los rechazos, lo que puede darse por averías en las máquinas o desgaste de las piezas.

## 7.4. Conclusiones parciales

Se cumplió el objetivo del capítulo al poder clasificar cada uno de los escenarios según aspectos cualitativos como mantenibilidad, operatividad y efecto en el medio ambiente, además de considerar el beneficio económico otorgado para caracterizar las alternativas según el beneficio que entregan.

A partir de los resultados del Análisis Multicriterio, la alternativa de mayor beneficio para Softys corresponde a la adquisición e instalación de un cabezal cónico en el extremo del Tornillo 51. El Análisis de Sensibilidad entrega este mismo resultado independiente de las prioridades que se tengan, la mejor alternativa en todos los casos es aquella relacionada al cabezal cónico en el Tornillo 51; lo que cambia serán los siguientes escenarios a implementar en caso de que se desee mejorar la operación según las prioridades de la Empresa.

Para implementar este escenario, primero se debe contactar al proveedor para adquirirlo, luego se debe instalar con ayuda del equipo de mantención que ya ha hecho trabajos similares, por lo que no necesitan una capacitación adicional. Posteriormente, se deben hacer pruebas tal que se encuentre un punto óptimo de operación en que se maximice la producción (pasta que va a la Prensa Doble Tela) y se minimice la consistencia del drenaje según una abertura de caudal que permita cumplir con las toneladas diarias de fabricación.

En resumen, el análisis cualitativo ha proporcionado una sólida base para la toma de decisiones, identificando la alternativa más favorable y delineando claramente los pasos a seguir para su implementación. Con estos resultados en mente, Softys está bien posicionada para avanzar hacia mejoras significativas en términos de rendimiento, sostenibilidad y eficiencia operativa.

# Capítulo 8

## Discusiones generales

La problemática de pérdida de insumos útiles se abordó desde un enfoque de disminución másica en vez de reutilización, logrando una disminución del volumen de residuos generados por el proceso y, por ende, aumentando la eficiencia de la Planta. Esto se puede visualizar en la ecuación 2.1 al disminuir las pérdidas no deseadas, que por consecuencia trae un índice de rendimiento más cercano a uno, en que las pérdidas no deseadas son nulas. Además, se valida el enfoque de “Utilización de capacidad” visto en la misma sección para la industria papelera, que actualmente tiene un enfoque en reutilizar los residuos generados (“Reducción de desechos” en el mismo listado), por lo que, para futuros trabajos de disminución de pérdida de fibra, se sugiere primero el enfoque de Utilización en caso de que el proceso no tenga el Rendimiento máximo teórico, es decir, que no se encuentre optimizado.

Los resultados del presente reporte permiten establecer un orden de prioridades de acción para la disminución de pérdida de fibra útil, entregando un enfoque íntegro en términos de cuantificación de beneficios al contemplar aspectos no sólo económicos, sino que también operativos y ambientales. Esta información será utilizada para tomar decisiones de compra y para determinar nuevas directrices de investigaciones en terreno, tales como verificar puntos óptimos de operación, revisar el entorno de un equipo y diseñar modelos de comportamientos de la maquinaria, lo que, como consecuencia, disminuirá más la fibra útil en los rechazos de agua, aumentando la eficiencia del proceso.

Durante la realización del trabajo de título se tomaron suposiciones para la obtención de resultados, estos supuestos se emplearon como vías de simplificación, y también como respuesta a las limitaciones de equipamiento y tiempo que imposibilitaban la obtención de los datos necesarios para avanzar. Estos supuestos son aproximaciones de ecuaciones, valores y porcentajes para cuantificar beneficios; lo que permitió obtener resultados presentables a la empresa y poder sugerir mejoras para iteraciones de evaluaciones técnico-económicas con el fin de conseguir valores de beneficios más precisos.

Se realizaron tres pruebas en el transcurso del estudio, las que permitieron deducir indicaciones para futuras modificaciones que se deseen hacer en terreno, además de que permitió definir efectos de los escenarios propuestos. Las indicaciones encontradas son: realizar las pruebas en la menor ventana de tiempo permitida y verificar el estado de los repuestos de la maquinaria, esto permitirá tener resultados más confiables al realizar pruebas en los equipos, puesto que reduce posibles efectos de externalidades en las mediciones. Por último, se presen-

tó la disyuntiva relacionada a la automatización de un proceso, lo que podría ser enfoque de un futuro trabajo; esto ya que, si bien se minimiza la pérdida de fibra en los rechazos cuando se automatiza la operación, se involucra a personal externo en caso de existir una complicación, lo que podría causar retrasos en la producción en el peor de los casos; la respuesta a esta disyuntiva dependerá de las prioridades de Softys.

Para futuras investigaciones relacionadas con la disminución de pérdida de fibra útil en el proceso de elaboración de Jumbo, se recomienda estudiar otras recetas con un mayor porcentaje de fibra reciclada y volver a medir el porcentaje de fibra útil en los rechazos, esto con el fin de obtener una comprensión más detallada de cada escenario en distintas condiciones de operación. Además, el valor de venta de la fibra varía año a año, por lo que se debe revisar antes de cuantificar los beneficios asociados.

En las condiciones actuales, el cambio de equipos no es un escenario favorable, sobre todo porque hay opciones de menor complejidad que generan un mayor retorno de la inversión y más beneficios tanto económicos como ambientales. Se especula que estas alternativas serán favorables en un futuro, cuando los otros escenarios inspeccionados no sean suficientes para disminuir la pérdida de fibra útil, ya sea por deterioro de maquinaria o mayores exigencias de producción.

# Capítulo 9

## Conclusiones generales

Se cumplieron los objetivos específicos según lo realizado en cada capítulo, por lo que se puede concluir el cumplimiento del objetivo general al haber evaluado mejoras en equipos de la línea de preparación pasta con el fin de disminuir la pérdida de fibra útil en los rechazos de la operación de línea.

Los escenarios propuestos se enumeran a continuación según su puntuación en el análisis multicriterio:

1. Instalación de Cabezal en Tornillos.
2. Variador de Frecuencia en Tornillos.
3. Sistemas de Regaderas en Prensa.
4. Lazo control en Espesador.
5. Cambio de Tornillos y Espesador a Washer.
6. Cambio de Prensa Doble Tela a ScrewPress.

En que el escenario con mayor puntaje es la instalación de cabezal en el Tornillo 51, y en primer lugar, se debe contactar al proveedor para su adquisición, mientras que la instalación puede ser realizada por personal de mantención. Luego de dejar operativo el cabezal, se deben hacer pruebas en terreno para ver el punto óptimo de su altura y el efecto en los filtrados, en la entrada a la Prensa y en la eficiencia del Disperguer. Una vez encontrado este punto, se deben actualizar los estándares de consistencias para que concuerden con la operación de los Tornillos con cabezales instalados.

El beneficio otorgado por la implementación del escenario se percibirá en una disminución de costos al tener un menor volumen de lodos que tratar, y también disminuye el costo de oportunidad al perder menos fibra, lo que se pudo cuantificar con un VAN de 3,8 miles de dólares y una TIR del 10.596,2%, lo que significa que es un proyecto muy rentable debido a su menor costo de inversión y los ahorros de fibra que produce en los rechazos tanto de los Tornillos como de la Prensa. Además, genera menos carga en los equipos de procesamiento de lodos, pero este beneficio se escapa del alcance del trabajo, por lo que se recomienda estudiar el efecto del ahorro de fibra en la carga de los equipos del proceso de tratamiento de agua fibrosa para darle más precisión al beneficio percibido por cada escenario. También existe

un beneficio no medible que está relacionado con la política cero residuos de Softys, lo que permitirá adaptarse con más facilidad a mayores exigencias legales que respeten a emisión de residuos.

Como se mencionó en las discusiones, el cambio de equipos no es un cambio favorable a corto plazo, lo que se corrobora con la lista anterior. Es por ello que se sugiere implementar este escenario como último recurso, es decir, cuando las soluciones planteadas no basten para disminuir la pérdida. Esto puede darse por deterioro de las piezas o aumento de las exigencias de producción.

Junto con lo anterior, se recomienda medir la corriente en vacío y en servicio con el cabezal en operación para contemplar la posibilidad de instalar además un variador de frecuencia, que transformará la velocidad de los tornillos de fija a variable para minimizar la pérdida de fibra en el filtrado ante cambios en el caudal de entrada. Esto es sólo si el uso de la corriente es menor al 75 % de la corriente nominal de los Tornillos puesto que, en caso contrario, causará daños al motor. Se sugiere también repetir el análisis de sensibilidad cuando los Tornillos hayan tenido un cambio de repuestos reciente, esto para verificar el efecto de cerrado en la consistencia de los filtrados visto en la teoría y así re afirmar la necesidad de implementar un VDF al ver el efecto de cambiar el grado de abertura o cerrado de las válvulas en el filtrado de los Tornillos.

Con la realización de este trabajo se evaluó el rendimiento de equipos funcionando en sus condiciones estándar, y cabe destacar que, para el caso de los Tornillos, la condición estándar tuvo un mejor desempeño que la configuración habitual. Esto sugiere que las condiciones estándares son las óptimas, lo que podría también aplicar para el resto de equipos; por lo que, antes de cualquier modificación, se deben hacer pruebas de desempeño. Este razonamiento es análogo para los centerline de los equipos, también evidenciado por el cabezal de los Tornillos, el alejarse de lo establecido por los estándares de funcionamiento (válvulas en 7 centímetros) resulta en una disminución significativa de la eficiencia, traduciéndose en una mayor pérdida de fibra útil en caso de abertura y menor caudal de producción en caso de cerrado. Por ende, se resalta la importancia de mantener la maquinaria dentro de los límites preestablecidos por el estándar para garantizar un desempeño eficaz y minimizar las pérdidas asociadas.

Lo anterior junto con los resultados del análisis multicriterio permite también concluir que las soluciones para un equipo pueden ser de baja complejidad, es decir, que no impliquen el reemplazo total de la maquinaria existente. Este último caso no tiene percepción inmediata de beneficios, a veces necesitando más de un año para empezar a percibir utilidades.

En caso de seguir con los escenarios relacionados con controladores, se recomienda encontrar la ecuación que asocia las consistencias de entrada y de salida del Espesador con la velocidad del motor y, para el caso de los Tornillos, la ecuación que asocia el caudal de entrada con la velocidad de rotación. Esto puede ser mediante pruebas y mediciones en terreno junto con aproximaciones dadas por bibliografía.

Los escenarios que involucran reemplazo por maquinaria moderna no presentan una ganancia significativa a corto plazo, pero en caso de que se decida su implementación, se debe contactar con el proveedor para pago del equipo. Luego, se debe programar una detención

de línea según el plazo de llegada de la maquinaria a Planta, además de contactar con la empresa externa para programar la desmantelación de los equipos a reemplazar. Una vez llegado el Sistema moderno, se debe armar en el taller mecánico y detener línea de producción para la desmantelación de los equipos y piping a reemplazar. Posterior a la instalación del equipo, se deben hacer las conexiones de piping, agua y electricidad según se requiera para el funcionamiento del nuevo Sistema. Por último, se deben hacer pruebas en terreno con el fin de verificar la correcta instalación de la maquinaria y que sus conexiones se hayan hecho correctamente, teniendo un período de marcha blanca antes de volver al régimen de producción habitual.

Para futuros trabajos, ya sea con el fin de afinar los resultados obtenidos o de repetir esta evaluación en un futuro, se recomienda medir nuevamente el porcentaje de fibra útil en los rechazos para tener un valor preciso de ahorro para la evaluación económica, y por otro lado, se sugiere el estudio del comportamiento de la bomba intermedia entre los Tornillos y la Prensa Doble Tela con el fin de disminuir las pérdidas por partida de línea, en que la baja consistencia de la caja de nivel causa un caudal de pasta que va a drenaje; esto puede ser mediante optimización de tiempos de operación con tal de minimizar las detenciones de línea o mediante reformas a la bomba ya mencionada.

Por último, como se mencionó en la discusión, se recomienda hacer las pruebas en una ventana de tiempo que minimice los cambios de condición en la línea para disminuir lo más posible la influencia de factores externos.

# Bibliografía

- [1] Paper Tr, EMIRSON Global. 2021. What is Tissue Paper? [en línea] <<https://www.papertr.com/what-is-tissue-paper/>>.
- [2] American Forest Paper Association. [s.a]. Why Paper Towels are preferred for Hand Drying? [en línea] <<https://www.afandpa.org/statistics-resources/why-paper-towels-a-re-preferred-hand-drying>>.
- [3] European Tissue Symposium. 2021. The Truth About Tissue Paper [en línea] <[https://europeantissue.com/wp-content/uploads/2021/01/ETS\\_ART\\_Scientist\\_View\\_EN.pdf](https://europeantissue.com/wp-content/uploads/2021/01/ETS_ART_Scientist_View_EN.pdf)>.
- [4] Bridge Market Research. 2021. COVID-19 Impact on Tissue Paper in the FMCG Industry [en línea] <https://www.databridgemarketresearch.com/covid-19-resources/covid-19-impact-on-tissue-paper-in-the-fmcg-industry>.
- [5] Mordor Intelligence. 2018. Mercado de Papel Tisú: Crecimiento, Tendencias, Impacto de COVID-19 y pronósticos(2023 - 2028) [en línea] <<https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/global-tissue-paper-market-industry>>.
- [6] Paper Tr, EMIRSON Global. 2021. Who Uses Paper Towel the Most? [en línea] <<https://www.papertr.com/who-uses-paper-towel-the-most/>>.
- [7] Statista. [s.a]. Market Insights: Paper Tissues - Worldwide [en línea] <https://www.statista.com/outlook/cmo/tissue-hygiene-paper/paper-tissues/worldwide>.
- [8] Statista. [s.a]. Market Insights: Pharmaceuticals - Worldwide [en línea] <https://www.statista.com/outlook/hmo/pharmaceuticals/worldwide>.
- [9] Statista. [s.a]. Market Insights: Energy - Worldwide [en línea] <https://www.statista.com/outlook/io/energy/worldwide>.
- [10] Instituto Nacional de Estadísticas. 2018. Estimaciones y proyecciones de la población de Chile 1992-2050 Total País [pdf] <<http://www.censo2017.cl/descargas/proyecciones/metodologia-estimaciones-y-proyecciones-de-poblacion-chile-1992-2050.pdf>>.
- [11] Tissue Online Latin America. Julio 12, 2021. Softys alcanza el primer lugar en el mercado de América Latina [en línea] 12 de Julio del 2021 <<https://tissueoninelatinoamerica.com/softys-alcanza-el-primer-lugar-en-el-mercado-de-america-latina/>>.
- [12] SOMSEN, D. 2004. Production yield analysis-a new systematic method for improvement of raw material yield [en línea] Trends in Food Science and Technology. Mayo 2004. Vol. 15 issue 5 <<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2003.11.002>>.
- [13] HORTON M. P. 2017. Yield Improvement oportunities for manufacturing automotive sheet metal components [en línea] Journal of Materials Processing Technology. Noviembre 2017. Vol. 249 Número 0924-0136 <<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.05.0>>.

37>.

- [14] MAHONEY J.K. 2015. Agronomic Management Strategies to Reduce the Yield Loss Associated with Spring Harvested Corn in Ontario [en línea] American Journal of Plant Sciences. Febrero 2015. Vol.6 Número 2 <[dx.doi.org/10.4236/ajps.2015.62043](https://doi.org/10.4236/ajps.2015.62043)>.
- [15] BUTARDO JR. M. V. 2018. Improving Head Rice Yield and Milling Quality: State-of-the-Art and Future Prospects [en línea] Rice Grain Quality. 06 Noviembre 2018. Vol.1892 <[https://doi.org/10.1007/978-1-4939-8914-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-8914-0_1)>.
- [16] Inecta. 2023. Yield Management In Food Manufacturing Explained [en línea] <https://www.inecta.com/blog/yield-management-in-food-manufacturing-explained>.
- [17] BARBER, S. 1998. Analysis and Prevention of Usable Fiber Loss From a Fine Paper Mill. Tesis Máster de Ciencias. Virginia, Estados Unidos. Virginia Polytechnic Institute and State University [en línea] <<http://hdl.handle.net/10919/37004>>.
- [18] AZAGRA, J. 2013. Evaluación técnica y económica de alternativas para la recuperación de fibra en la salida del proceso papelerero. Memoria para Ingeniero Civil Químico. Santiago, Chile. Universidad de Chile [pdf] <<https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/115074>>.
- [19] Reunión de análisis de funcionamiento de la maquinaria. (Rojas, L. Comunicación personal, 30 de septiembre 2023).
- [20] YOOSEFDUST, A. 2021. Design Guideline for Hydropower Plants Using One or Multiple Archimedes Screws [en línea] Processes. 25 de Noviembre 2021. Vol. 9 Número 12: 2128 <<https://doi.org/10.3390/pr9122128>>.
- [21] Nicolás Quezada. [s.a]. Diagrama de equipos con tela. Documento de uso interno.
- [22] Alucema, F. 2020. Diseño de un Tambor Aglomerador [en línea] <https://idoc.pub/documents/idocpub-19n03g9d93nv>.
- [23] YOOSEFDUST, A. 2021. Archimedes Screw Design: An Analytical Model for Rapid Estimation of Archimedes Screw Geometry [en línea] Energies. 22 Noviembre 2021. Vol. 14 Número 22: 7812 <<https://doi.org/10.3390/en14227812>>.
- [24] KADANT. [s.a]. Manual de uso e instalación del Espesador Tornillo. Documento de uso interno de la Empresa.
- [25] ERINOFIARDI, E., KOIRALA, R., SHIWAKOTI, N., DATE, A. 2022. Sustainable Power Generation Using Archimedean Screw Turbine: Influence of Blade Number on Flow and Performance [en línea] Sustainability. 30 Noviembre 2022. Vol. 14 Número 23: 15948 <<https://dx.doi.org/10.3390/su142315948>>.
- [26] Reunión con personal de ANDRITZ. (Meza, F. Comunicación personal, 29 de septiembre 2023).
- [27] CERUTTI, F. RE:Medidas de la Tela de la Prensa y Catálogos [en línea] En: gmail.com miércoles 13 de septiembre <@kadant.com>.
- [28] EL IDRISSE B, LORANGUER E., LANOUILLE R., BOUSQUET JP., MARTINEZ M. 2019. Dewatering Parameters in a Screw Press and their Influence on the Screw Press Outputs [en línea] Chemical Engineering Research and Design. Diciembre 2019. Volumen 152 <<https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.10.001>>.
- [29] XIE, S. 2018. How to Wash the Paper Machine Felt [en línea] <<https://www.linkedin.c>

- [om/pulse/how-wash-paper-machine-felt-shirley-xie>](#).
- [30] ILLESCA, J. [s.a]. Limpieza de las telas. En: Telas plásticas y el extremo húmedo. Documento de uso interno, Softys, Puente Alto. pp. 05-06.
  - [31] KADANT. Thickening, DNT Pulp Washing Thickener [en línea] <https://fiberprocessing.kadant.com/en/products/thickening>.
  - [32] Reunión con personal de VOITH. (Ruffo, R. Comunicación personal, 11 de octubre 2023).
  - [33] Garcés, D. Softys Puente Alto - Solicitud de Revisión de Catálogo [en línea] En: <@softys.com> 30 de septiembre 2023. <@voith.com>.
  - [34] PAS Ingeniería y Servicios LTDA. 2023. Presupuesto de Tendido de conductor. Sin publicar.
  - [35] MORAIS, F. 2019. Characterization data of pulp fibres performance in tissue papers applications [en línea] Material Letters. Diciembre 2019. Vol.4 Número 100028 <<https://doi.org/10.1016/j.mlblux.2019.100028>>.
  - [36] Reunión con personal de Ingeniería. (Salas, A. Comunicación personal, 28 de septiembre 2023.).
  - [37] KADANT Lamort S.A.S. 2023. Spare Parts for Water Extractor. Sin publicar.
  - [38] PAS Ingeniería y Servicios Ltda. 2023. Tendido de conductor transmisor. Sin publicar.
  - [39] Lantier Solutions. 2023. Oferta: Regadíos Oscilantes Lantier con Sistema de Limpieza para Prensas. Sin publicar.
  - [40] VOITH Paper Ltda. 2023. REF: Washer RF Line. Sin publicar.
  - [41] VOITH Paper Ltda. 2023. REF: Screw Press RF Line. Sin publicar.
  - [42] United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD). 2021. Freight rates, maritime transport costs and their impact on prices. En: Review of Maritime Transport 2021. UNCTAD pp. 57 –78.
  - [43] PETERS, M. 2003. Analysis of Cost Estimation. En: Plant Design and Economics for Chemical Engineers. Quinta Edición. Nueva York. Mc Graw Hill. pp. 226 – 275.
  - [44] Montajes Industriales Ltda. 2023. Desmontaje de Prensa Doble Tela y Piping asociado. Sin publicar.
  - [45] Montajes Industriales Ltda. 2023. Desmontaje de Espesador de Papel Viejo y Piping asociado. Sin publicar.
  - [46] Montajes Industriales Ltda. 2023. Desmontaje de Tornillos 50 y 51 y Piping asociado. Sin publicar.
  - [47] AGUILERA, S. 2022. Evaluación del Impacto Ambiental de un proceso de producción de papel tissue a partir de celulosa y papel reciclado mediante un análisis de ciclo de vida. Memoria para Ingeniero Civil Químico. Santiago, Chile. Universidad de Chile [pdf] <<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/185732>>.
  - [48] Energía Abierta. 2023. Base de datos «Factores de Emisión» [en línea] Comisión Nacional de Energía <<http://energiaabierta.cl/visualizaciones/factor-de-emision-sic-sing/>>.
  - [49] RAGHUVANSHI, S. 2017. Waste Water Treatment Plant Life Cycle Assessment: Treatment Process to Reuse of Water [en línea] Procedi CIRP. 19 Abril 2017. Vol. 61

<<https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.170>>.

- [50] Vaxa Software. [s.a]. Densidad del agua líquida a varias temperaturas [pdf] [http://www.vaxasoftware.com/doc\\_edu/qui/denh2o.pdf](http://www.vaxasoftware.com/doc_edu/qui/denh2o.pdf).
- [51] FREER, J. 2003. Estimating the Density and Pulp yield of E. globulus Wood by driftmir spectroscopy and Principal Components Regression (PCR) [en línea] Journal of the Chilean Chemical Society. 3 de Abril de 2003. Vol. 48 Número 3 <<http://dx.doi.org/10.4067/S0717-97072003000300003>>.

# Anexos

## Anexo A. Metodología de medición flujo másico de fibra útil

Para la medición del flujo másico de pérdida de fibra útil se diseñó una metodología de cuatro pasos: medición de flujo volumétrico, medición de porcentaje de consistencia, medición de porcentaje de fibra útil y balance de masa. Se detalla cada una a continuación.

### Medición de flujo volumétrico

Los flujos de rechazo de agua tienen dos posibles destinos: Drenaje o Tanque intermedio, cada uno con su respectivo procedimiento de medición, y en esta sección se verán ambos.

Los puntos de medición con sus rechazos a drenaje se pueden medir con el balde de 15 Litros o con los frascos de muestra de 1,1 Litros prestados por el laboratorio del área de preparación pasta. Para ello se ubica el recipiente lo más centrado posible debajo de la tubería de rechazo y se cronometra el tiempo que demora en llenar, pudiendo obtener el flujo volumétrico utilizando la siguiente ecuación:

$$F \left[ \frac{L}{s} \right] = \frac{V_{muestra}[L]}{t_{llenado}[s]}$$

En donde  $V_{muestra}$  corresponde al volumen llenado, que es común que varíe, ya que al medir no se llena todo el frasco de muestreo puesto que causa dificultad al transportarlo; y este volumen se mide con ayuda de una probeta para dar exactitud en la medición de flujo. Posteriormente, en caso de no haber utilizado las frascos para la medición anterior, se toma una muestra del flujo con este instrumento con el fin de medir la consistencia.

Para los flujos cuyo rechazo va a un tanque intermedio, se utiliza el software de trabajo para calcular en cuánto tiempo se percibe un cambio porcentual en el llenado del tanque. En la interfaz se puede ver la disposición de los equipos de trabajo junto con sus tanques, bombas y válvulas asociadas; pudiendo abrir y cerrar estas últimas desde remoto haciendo uso del software. Con esto es posible dejar sólo un flujo de entrada al tanque de interés, y utilizando los sensores de nivel integrados se pueden ver cambios en su volumen de llenado, con lo que se calcula el flujo en metros cúbicos por segundo.

Para obtener este dato se les solicita a los operadores que cierren todas las bombas y válvulas de los flujos de entrada y salida que no sean de interés, y luego se hace registro de la hora en que el tanque sólo recibe el flujo que se desea medir. Luego, se deja pasar aproximadamente entre 30 y 120 segundos o se espera a ver un aumento de volumen en el sensor de

nivel antes de pedir el regreso a la operación habitual, abriendo las entradas y salidas para estabilizar el nivel del tanque. El flujo volumétrico se obtiene con lo siguiente:

$$F \left[ \frac{L}{s} \right] = \frac{\%Final_{llenado} - \%Inicial_{llenado}}{t_{llenado}[s]} \cdot V_{tanque} [m^3] \cdot \frac{1000[L]}{1[m^3]}$$

## Medición de porcentaje de consistencia

A continuación se detallan los pasos a seguir para la medición de consistencia según el documento oficial de la línea de preparación de pasta de papel.

- **Paso 1:** Sacar un filtro de 15 cm de la plancha.
- **Paso 2:** Masar este filtro en la balanza, sacarlo de la balanza y escribir la masa en el filtro.
- **Paso 3:** Escribir la receta, la fecha y el punto de muestreo en el filtro con el fin de identificar la medición.
- **Paso 4:** Dejar el filtro en el embudo sobre el matraz Kitasato y mojar el filtro con agua destilada con el fin de que quede adherido al embudo.
- **Paso 5:** Sacar 50 mL de la muestra a analizar.
- **Paso 6:** En caso que la muestra tenga alto contenido de pasta, diluir en una probeta con 25 mL de agua.
- **Paso 7:** Verter la muestra o dilución sobre el filtro sobre el embudo.
- **Paso 8:** Abrir la válvula de vacío asociada al matraz donde se encuentra la muestra.
- **Paso 9:** Esperar hasta que visualmente haya filtrado toda el agua (no hay agua sobre el filtro y hay una película de fibra sobre el filtro) antes de cerrar la válvula.
- **Paso 10:** Sacar el filtro del embudo y llevarlo a secar a la plancha.
- **Paso 11:** Cuando el filtro se sienta seco al tacto, llevarlo a masar a la balanza nuevamente.
- **Paso 12:** Escribir la nueva masa debajo de la original.
- **Paso 13:** La diferencia entre estas dos resultará en los gramos por 50 mL.
- **Paso 14:** Al duplicar el valor, se tendrán los gramos de fibra por 100 mL. Este valor será la consistencia.

Cabe destacar que el valor de consistencia en gr/mL es equivalente en kg/L.

## Medición de porcentaje de fibra útil

El porcentaje de fibra útil es posible cuantificarlo al utilizar una máquina que hace el análisis. Para que funcione correctamente, se debe preparar la muestra de la forma en que se detalla a continuación.

Utilizando el valor de consistencia obtenido en el paso anterior, se debe hacer una regla de tres para obtener la cantidad de volumen en la que habrá un gramo. Para una consistencia  $x$  se obtiene de la siguiente forma:

$$\begin{array}{rcl} 100 \text{ mL} & \times & \text{gr} \\ y \text{ mL} & & 1 \text{ gr} \end{array}$$

$$y = \frac{100[mL] \cdot 1[gr]}{x[gr]} \quad (\text{A.1})$$

La muestra de  $y$  mL se disuelve en un litro de agua. De esta dilución de volumen  $1000+y$  mL, se extraen 40 mL que se diluyen en un Litro de agua destilada, esto con el fin de evitar que el equipo se tapone o se ensucie, teniendo así una solución de 1040 mL para el análisis.

Luego de hacer funcionar el equipo y que finalizara el análisis, el equipo entrega un parámetro denominado %Finos, que cuantifica en porcentaje cuánto de la muestra contiene fibra de menor tamaño (no útil), polvo, astillas, etcétera. Esto se ve de la siguiente forma en los resultados:

```

FINOS
Número de finos analizados      78009
Contenido de finos, millones/g de pulpa      488.569
Contenido de finos, % en área      35.989
Contenido de finos, % en largo      65.070
Contenido de finos, % en largo ponderado en largo      6.247
    
```

Figura A.1: Ejemplo de porcentaje de finos en los resultados. Elaboración propia.

Se obtiene el porcentaje de fibra útil de la muestra de la siguiente forma:

$$\%Fibra_{\text{útil}} = 100\% - \%Finos$$

## Balance de masa

Para obtener el flujo másico de pérdida de fibra útil se multiplican linealmente todos los valores anteriores como se vio en la ecuación 3.1 que se reitera a continuación:

$$M \left[ \frac{kg}{dia} \right] = F_v \left[ \frac{L}{s} \right] \cdot \%Consistencia \left[ \frac{kg_{fibra}}{L} \right] \cdot \%Fibra_{\text{util}} \left[ \frac{kg_{util}}{kg_{fibra}} \right] \cdot \frac{3600[s]}{1[hr]} \cdot \frac{14[hr]}{1[dia]}$$

## Anexo B. Memoria de cálculo: Rango de flujos del Espesador

Se puede relacionar el flujo de entrada al Espesador de Papel Viejo con la consistencia que entra a este. Se tiene que la capacidad del colador CH-5 previo al equipo tiene una capacidad de 2000  $[L/min]$ , y que tiene una tasa de rechazo del 20 %, es decir:

$$F_{in} = 80 \% \cdot 2000 \left[ \frac{L}{min} \right] = 1600 \left[ \frac{L}{min} \right]$$

Se sabe que el rango de consistencias de entrada al Espesador es entre 2 % y 4 %, por lo que podemos obtener la cantidad de kilos que procesa el equipo:

$$F_{mín} = 2 \% \left[ \frac{kg_{fibra}}{L} \right] \cdot 1600 \left[ \frac{L}{min} \right] = 32 \left[ \frac{kg_{fibra}}{min} \right]$$

Lo obtenemos en toneladas por día:

$$F_{mín} = 32 \left[ \frac{kg_{fibra}}{min} \right] \cdot \frac{60[min]}{1[h]} \cdot \frac{24[h]}{1[día]} \cdot \frac{1[ton_{fibra}]}{1000[kg_{fibra}]} = 46,08 \left[ \frac{ton_{fibra}}{día} \right]$$

El proceso es análogo para una consistencia de un 4 %:

$$F_{máx} = 4 \% \left[ \frac{kg_{fibra}}{L} \right] \cdot 1600 \left[ \frac{L}{min} \right] = 64 \left[ \frac{kg_{fibra}}{min} \right]$$
$$\leftrightarrow F_{máx} = 64 \left[ \frac{kg_{fibra}}{min} \right] \cdot \frac{60[min]}{1[h]} \cdot \frac{24[h]}{1[día]} \cdot \frac{1[ton_{fibra}]}{1000[kg_{fibra}]} = 92,16 \left[ \frac{ton_{fibra}}{día} \right]$$

Con lo que se tiene el rango másico de 46,08 – 92,16 toneladas al día de procesamiento, si se trabajara las veinticuatro horas del día. En caso de que se trabaje en 14 horas (tiempo de operación para la receta de trabajo):

$$F_{mín}(14[hr]) = 32 \left[ \frac{kg_{fibra}}{min} \right] \cdot \frac{60[min]}{1[hr]} \cdot \frac{14[hr]}{1[día]} \cdot \frac{1[ton_{fibra}]}{1000[kg_{fibra}]} = 26,88 \left[ \frac{ton_{fibra}}{día} \right]$$
$$\leftrightarrow F_{máx}(14[hr]) = 64 \left[ \frac{kg_{fibra}}{min} \right] \cdot \frac{60[min]}{1[hr]} \cdot \frac{14[hr]}{1[día]} \cdot \frac{1[ton_{fibra}]}{1000[kg_{fibra}]} = 53,76 \left[ \frac{ton_{fibra}}{día} \right]$$

Con lo que el rango de trabajo resultaría en 26,88 – 53,76 toneladas al día de procesamiento.

## Anexo C. Memoria de cálculo: Densidad del flujo de entrada al Espesador

Se consideraron las siguientes densidades para el agua [50]:

$$\rho_w(35^\circ C) = 994,08 \left[ \frac{kg}{m^3} \right] = 0,99408 \left[ \frac{gr}{cm^3} \right]$$

$$\rho_w(45^\circ C) = 990,22 \left[ \frac{kg}{m^3} \right] = 0,99022 \left[ \frac{gr}{cm^3} \right]$$

Que se aproximaron a 0,9941 y a 0,990  $[gr/cm^3]$  respectivamente. Para el caso de la densidad de la fibra de papel, se aproximó a la densidad promedio de la fibra de eucalipto [51]:

$$\rho_{fibra} = 484,4 \left[ \frac{kg}{m^3} \right] = 0,4844 \left[ \frac{gr}{cm^3} \right]$$

Luego, dependiendo de la consistencia, se ponderó por los factores correspondientes:

$$\rho_{in}(2\%; 35^\circ C) = 0,98 \cdot 0,9941 + 0,02 \cdot 0,4844 \approx 0,984 \left[ \frac{gr}{cm^3} \right]$$

$$\rho_{in}(2\%; 45^\circ C) = 0,98 \cdot 0,990 + 0,02 \cdot 0,4844 \approx 0,980 \left[ \frac{gr}{cm^3} \right]$$

Y para un 4% de consistencia:

$$\rho_{in}(4\%; 35^\circ C) = 0,96 \cdot 0,9941 + 0,04 \cdot 0,4844 \approx 0,974 \left[ \frac{gr}{cm^3} \right]$$

$$\rho_{in}(4\%; 45^\circ C) = 0,96 \cdot 0,990 + 0,04 \cdot 0,4844 \approx 0,970 \left[ \frac{gr}{cm^3} \right]$$

## Anexo D. Mediciones de la velocidad de los Tornillos

Se midió la velocidad de giro de los Tornillos de forma visual y con cronómetro, obteniendo los siguientes datos:

Tiempos de vuelta [s]	Tiempo [min]	1/min
1,61	0,027	37,04
1,69	0,028	35,71
1,68	0,028	35,71
1,73	0,029	34,48
1,51	0,025	40
1,67	0,028	35,71
1,71	0,029	34,48
1,53	0,026	38,46
1,66	0,028	35,71
1,64	0,027	37,04
1,66	0,028	35,71
1,58	0,026	38,46
1,88	0,031	32,26
1,79	0,03	33,33
1,63	0,027	37,04
1,44	0,024	41,67
1,45	0,024	41,67
1,73	0,029	34,48
1,43	0,024	41,67
1,66	0,028	35,71
1,92	0,032	31,25
1,6	0,027	37,04
1,6	0,027	37,04
1,58	0,026	38,46
1,63	0,027	37,04
1,59	0,027	37,04
1,77	0,03	33,33
1,62	0,027	37,04
1,55	0,026	38,46
1,69	0,028	35,71
1,65	0,028	35,71
1,71	0,029	34,48
1,47	0,025	40
1,61	0,027	37,04
1,73	0,029	34,48

1,58	0,026	38,46
1,73	0,029	34,48
1,67	0,028	35,71
1,63	0,027	37,04
1,7	0,028	35,71
1,58	0,026	38,46
1,65	0,028	35,71
1,51	0,025	40
1,66	0,028	35,71
1,78	0,03	33,33
1,49	0,025	40
1,63	0,027	37,04
1,7	0,028	35,71
1,64	0,027	37,04
1,73	0,029	34,48
1,5	0,025	40
1,73	0,029	34,48
1,57	0,026	38,46
1,62	0,027	37,04
1,73	0,029	34,48
1,65	0,028	35,71
1,53	0,026	38,46
1,65	0,028	35,71
1,67	0,028	35,71
1,71	0,029	34,48
1,46	0,024	41,67
1,73	0,029	34,48
1,56	0,026	38,46
1,77	0,03	33,33
1,57	0,026	38,46
1,65	0,028	35,71
1,72	0,029	34,48
1,53	0,026	38,46
1,57	0,026	38,46
1,57	0,026	38,46
1,81	0,03	33,33
1,57	0,026	38,46
1,63	0,027	37,04
1,71	0,029	34,48

1,58	0,026	38,46
1,71	0,029	34,48
1,64	0,027	37,04
1,59	0,027	37,04
1,66	0,028	35,71
1,54	0,026	38,46
1,7	0,028	35,71

Tabla D.1: Mediciones de velocidad de los Tornillos 50 y 51. Elaboración propia.

En que se obtiene que la velocidad promedio en rpm corresponde a:

$$\omega_{prom} \approx 36,62[rpm]$$

Llevando eso a radianes por segundo:

$$\omega_{prom} = 36,62[rpm] \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60[\frac{s}{min}]} = 3,835 \left[ \frac{rad}{s} \right]$$

## Anexo E. Desarrollo de la prueba de velocidad del Espesador

La prueba se realizó el 5 de diciembre del 2023. Se tomaron consistencias para comprobar la hipótesis inicial, obteniendo una consistencia de 2,56 % a la entrada y 0,2 % en el filtrado. Se realiza un balance de masa para ver la pérdida de fibra útil actual:

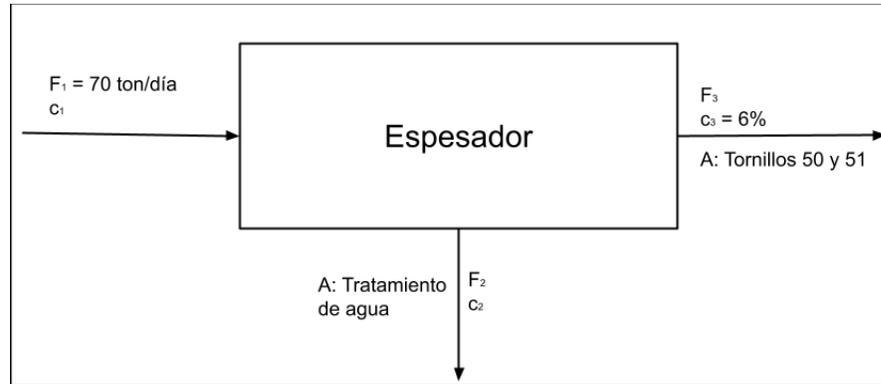


Figura E.1: Balance de masa del Espesador en su condición de trabajo inicial. Elaboración propia.

En que  $F_1 \cdot c_1 = 70 \left[ \frac{\text{ton}}{\text{día}} \right]$  debido a que es la exigencia de producción de la línea, y  $c_3 = 6\% \left[ \frac{\text{kg}}{\text{L}} \right]$  por condición de operación de los Tornillos estrujadores. Recordando el entorno de trabajo del Espesador:

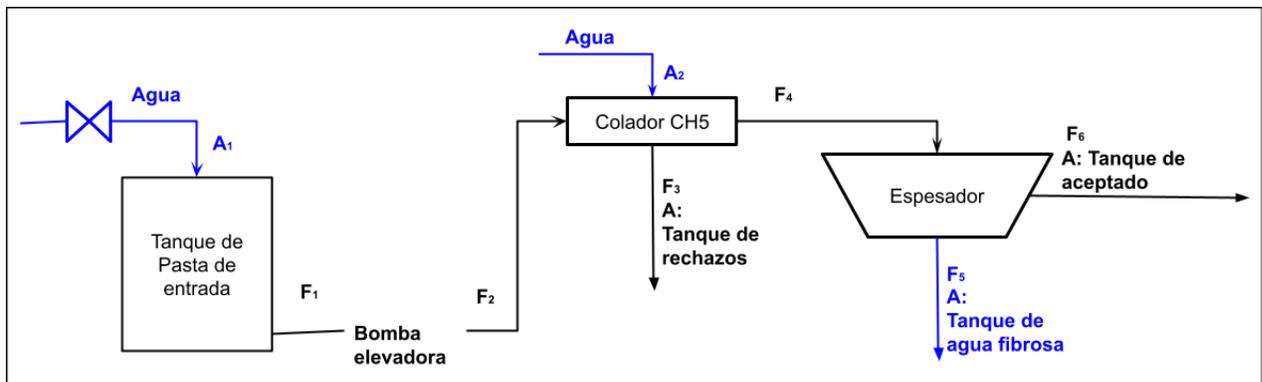


Figura E.2: Esquema del entorno de la prueba del Espesador. Elaboración propia.

Con el fin de corroborar los flujos obtenidos por balance de masa y que tuvieran el mismo comportamiento, se tomaron medidas de la variación porcentual de nivel en el tanque de pasta de entrada y tanque de aceptado:

Tabla E.1: Vaciado del tanque de pasta de entrada en condiciones de operación habitual. Elaboración propia.

Tiempo	% Llenado	$\frac{V_{llenado}}{V_{tanque}}$
11:06:28	23,49 %	
11:06:34	23,14 %	

Que resulta en un flujo de:

$$F_2 = \frac{(23,49\% - 23,14\%) \cdot 15[m^3] \cdot \frac{1000[L]}{1[m^3]}}{6[s]} = 8,75 \left[ \frac{L}{s} \right]$$

Tabla E.2: Llenado del tanque de aceptado en condiciones de operación habitual. Elaboración propia.

Tiempo	%Llenado	$\frac{V_{llenado}}{V_{tanque}}$
11:15:33	0,79 %	
11:16:09	7,65 %	
11:16:49	11,74 %	
11:17:15	13,8 %	
11:17:43	16,29 %	

Se calcula el flujo utilizando todos los datos a excepción del primero. Esto debido a que, haciendo uso del historial de flujos, el nivel del tanque de aceptado se registra de la siguiente forma:

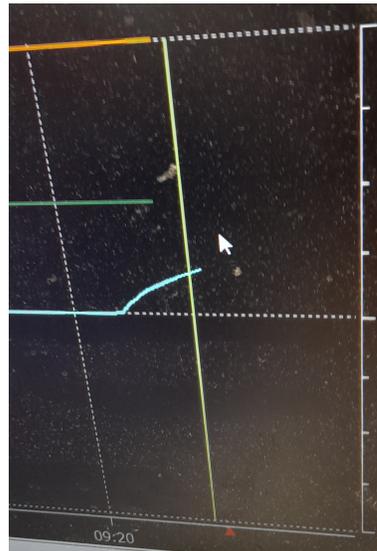


Figura E.3: Tendencia de nivel del tanque de aceptado en celeste. Elaboración propia.

Que no es un aumento lineal, sino logarítmico, por lo que se consideraron los siguientes intervalos para medir el flujo de llenado:

Tabla E.3: Mediciones de flujo de llenado del tanque de aceptado según intervalos de llenado. Elaboración propia.

Intervalo	Tiempo [s]	%Dif	Flujo salida $\left[\frac{L}{s}\right]$
3-2	40	4,09 %	76,69
4-3	26	2,06 %	59,42
5-4	28	2,49 %	66,70
4-2	66	6,15 %	69,89
5-2	94	8,64 %	68,94
5-3	54	4,55 %	63,19

Obteniendo un flujo promedio de  $F_6 = 67,47 \left[\frac{L}{s}\right]$ , que si se lleva a flujo másico se obtiene:

$$M_6 = F_6 \cdot c_6 = 67,47 \left[\frac{L}{s}\right] \cdot 6\% \left[\frac{kg}{L}\right] = 4,05 \left[\frac{kg}{s}\right] = 204 \left[\frac{ton}{dia}\right]$$

Esto es más de lo que la línea puede procesar (100 toneladas por día), por lo que ambas mediciones de variación de tanque se consideran incorrectas, esto ya que no se cerró la Bomba elevadora y se consideró sólo momentos de “extracción” en el gráfico, el cual no guardaba el historial y se reiniciaba cada vez que se veían las tendencias, causando complicaciones al medir. Se vuelve a medir este flujo en otra ocasión con las mismas condiciones.

Posterior a estas medidas se procedió a bajar la consistencia de entrada al hacer ingresar agua al tanque de pasta de entrada. La válvula de agua está cortada, por lo que se utilizó una manguera para disminuir la consistencia. Se esperó diez minutos antes de tomar consistencia nuevamente a la entrada del Espesador y del filtrado, pudiendo notar un aumento en la cantidad de flujo de agua extraído por el Espesador al ver un aumento en el nivel de agua fibrosa en la tinaja del equipo, casi rebalsándola.

Nuevamente se tomaron mediciones del tanque de pasta de entrada y del tanque de aceptado, pero en esta ocasión se cerró la bomba elevadora para ver los casos de llenado y vaciado.

Tabla E.4: Variación del nivel del tanque de pasta de entrada al cerrar y abrir la Bomba elevadora. Elaboración propia.

Tiempo	%Llenado	$\frac{V_{llenado}}{V_{tanque}}$
<b>Llenado de tanque</b>		
11:45:28	25,01 %	
11:45:52	38,29 %	
11:46:28	59,38 %	
<b>Vaciado de tanque</b>		
11:46:46	61,98 %	
11:47:47	54,49 %	
11:48:47	46,81 %	

Lo que nos entrega la siguiente información de flujos:

Tabla E.5: Obtención de flujos de llenado y vaciado del tanque de pasta de entrada según diferencia en intervalos. Elaboración propia.

Tiempo [s]	%llenado $\frac{V_{llenado}}{V_{tanque}}$	Flujo salida $\left[\frac{L}{s}\right]$
<b>Llenado</b>		
24	13,28 %	83
36	21,09 %	87,875
60	34,37 %	85,925
<b>Vaciado</b>		
61	7,49 %	18,42
60	7,68 %	19,2
121	15,17 %	18,806

Lo que permite obtener los siguientes flujos:

$$F_{llenado} = 85,6 \left[\frac{L}{s}\right]$$

$$F_{2,antes} = F_{vaciado} = 18,81 \left[\frac{L}{s}\right]$$

Por otro lado, para el tanque de aceptado se tiene:

Tabla E.6: Variación de volumen en el tanque de aceptado con disminución de consistencia. Elaboración propia.

Tiempo	%Llenado $\frac{V_{llenado}}{V_{tanque}}$
11:53:08	0,36 %
11:53:52	8,18 %
11:54:08	9,69 %
11:54:38	12,04 %
11:55:08	14,31 %

Obteniendo el siguiente cálculo de flujos, en que nuevamente se obvió la primera medida debido al tipo de llenado según las tendencias de nivel:

Tabla E.7: Obtención de flujos de llenado del tanque de aceptado según diferencia en intervalos. Elaboración propia.

Intervalo	Tiempo[s]	%Dif	Flujo $\left[\frac{L}{s}\right]$
3-2	16	1,51 %	70,78
4-3	30	2,35 %	58,75
5-4	30	2,27 %	56,75
4-2	46	3,86 %	62,93
5-2	76	6,13 %	60,49
5-3	60	4,62 %	57,75

Obteniendo un flujo promedio de:  $F_{6,antes} = 61,24 \left[\frac{L}{s}\right]$ .

Se cerró el agua luego de quince minutos con el fin de no rebalsar el tanque de pasta de entrada. Debido a que hay problemas con los filtros de papel, la toma de consistencias toma más del doble del tiempo usual, por lo que al momento de muestrear los puntos de interés, se debe esperar aproximadamente quince minutos para el resultado si se contabiliza el tiempo de secado.

Es por esto que, cuando se cambió la velocidad, se escogió arbitrariamente a 1.000 revoluciones por minuto, luego se esperó tres minutos antes de volver a tomar consistencia en el filtrado. Los valores de consistencia y su condición se reportan a continuación:

Tabla E.8: Mediciones de consistencias en el Espesador después de la prueba. Elaboración propia.

Medición	Consistencia $\left[\frac{kg_{fibra}}{kg_{total}}\right]$	Comentario
Entrada luego de abertura de agua	2,7 %	Se especula error de metodología.
Filtrado con 1.500 rpm	0,19 %	
Filtrado con 1.000 rpm	0,24 %	
Filtrado con 1.000 rpm	0,26 %	Se toma una nueva medida para respaldo.

Esto no se condice con lo esperado, principalmente porque hubo un aumento en la consistencia de entrada que se especula que fue por trabajo del Colador, que mejora su eficiencia a menor consistencia en su entrada; y por ende los filtrados tampoco se condicen con lo esperado. Se descartaron estas mediciones, conservando sólo las mediciones de consistencia tomadas inicialmente (2,56 % en la entrada y 0,2 % en el filtrado).

Se volvió a medir consistencia a la entrada y al filtrado mientras el Espesador trabajaba a 1.500 rpm, obteniendo una nueva consistencia de entrada de 2,14 % y de 0,2 % en el filtrado. Notando una disminución en la consistencia de entrada respecto a la primera medición, se utilizó ese valor para calcular una nueva velocidad:

$$v_{nueva} = \frac{1500[rpm] \cdot 2,14[kg/100L]}{2,56[kg/100L]} \approx 1.254[rpm] \rightarrow 1.250[rpm]$$

Se cambió la velocidad a 1.250 [rpm] y se esperó tres minutos para volver a sacar muestra del filtrado del Espesador, obteniendo una nueva consistencia de 0,06 %, y un flujo teórico

ya calculado anteriormente. Junto con esto, se volvió a medir el flujo de salida del tanque de pasta de entrada y de entrada al tanque de aceptado.

Tabla E.9: Variación del nivel del tanque de pasta de entrada con el Espesador en 1.250 rpm. Elaboración propia.

Tiempo	%Llenado	$\frac{V_{llenado}}{V_{tanque}}$
<b>Llenado de tanque</b>		
15:39:52	11,64 %	
15:40:52	31,92 %	
15:42:32	13,16 %	
15:43:32	32,65 %	
<b>Vaciado de tanque</b>		
15:38:42	20,98 %	
15:39:42	10,26 %	
15:41:14	27,98 %	
15:42:14	11,22 %	

Notando que sólo hay dos parejas de medición debido a que la bomba actuaba de forma cíclica:

Tabla E.10: Flujos de llenado y vaciado del tanque de pasta de entrada cuando el Espesador se encuentra en 1.250 rpm. Elaboración propia.

Intervalo	Tiempo[s]	%Dif	Flujo $\left[\frac{L}{s}\right]$
<b>Llenado</b>			
2-1	60	20,28 %	50,7
4-3	60	19,49 %	48,725
<b>Vaciado</b>			
2-1	60	10,72 %	26,8
4-3	60	16,76 %	41,9

Obteniendo lo siguiente:

$$F_{llenado} = 49,71 \left[ \frac{L}{s} \right]$$

$$F_{2,después} = F_{vaciado} = 34,35 \left[ \frac{L}{s} \right]$$

Por otro lado, para el tanque de aceptado se obtiene:

Tabla E.11: Llenado del tanque de aceptado con el Espesador en 1.250 rpm. Elaboración propia.

Tiempo	%Llenado	$\frac{V_{llenado}}{V_{tanque}}$
15:44:43	2,43 %	
15:45:13	7,82 %	
15:45:43	9,54 %	
15:46:13	10,64 %	
15:46:43	11,56 %	

Y análogo a los casos anteriores, se tiene lo siguiente para el cálculo de flujos:

Tabla E.12: Medición de flujo del tanque de aceptado según diferencias de intervalos cuando la velocidad del Espesador está en 1.250 rpm. Elaboración propia.

Intervalo	Tiempo[s]	%Dif	Flujo $\frac{L}{s}$
3-2	30	1,72 %	43
4-3	30	1,10 %	27,5
5-4	30	0,92 %	23
4-2	60	2,82 %	35,25
5-2	90	3,74 %	31,17
5-3	60	2,02 %	25,25

Obteniendo así un Flujo promedio de  $F_{6,después} = 30,86 \left[ \frac{L}{s} \right]$ .

Debido a las mediciones erróneas iniciales del flujo de salida del tanque de pasta de entrada, se tomaron medidas nuevamente de su vaciado al cerrar la Bomba elevadora, obteniéndose:

Tabla E.13: Llenado del tanque de pasta de entrada con Espesador en velocidad de 1.500 rpm con manipulación de bomba elevadora. Elaboración propia.

Tiempo	% Llenado	$\frac{V_{llenado}}{V_{tanque}}$
8:07:29	55,71 %	
8:07:51	47,23 %	
8:08:09	41,15 %	
8:08:29	34,45 %	
8:09:09	21,13 %	
8:09:29	14,71 %	

Ante estos valores, se obtuvo la siguiente tabla de diferencias:

Tabla E.14: Diferencia de intervalos de llenado del tanque de pasta de entrada para cálculo de flujo con Espesador en 1.500 rpm. Elaboración propia.

Intervalo	Tiempo [s]	%Dif	Flujo $\left[\frac{L}{s}\right]$
2-1	22	8,48 %	57,82
3-2	18	6,08 %	50,67
4-3	20	6,70 %	50,25
5-4	40	13,32 %	49,95
6-5	20	6,42 %	48,15

Obteniendo que, por promedio de flujos,  $F_{2,antes} = 51,37 \left[\frac{L}{s}\right]$ . De forma análoga se analizó la variación de volumen en el tanque de aceptado:

Tabla E.15: Llenado del tanque de aceptado cuando el Espesador trabaja a 1.500 rpm. Elaboración propia.

Tiempo	%Llenado	$\frac{V_{llenado}}{V_{tanque}}$
9:22:08	9,37 %	
9:22:28	11,80 %	
9:22:48	13,85 %	
9:23:08	15,75 %	
9:23:28	17,37 %	
9:23:48	18,90 %	
9:24:28	21,84 %	

Mediante análisis de diferencia de intervalos se obtiene lo siguiente:

Tabla E.16: Diferencia de intervalos de llenado del tanque de aceptado para cálculo de flujo. Elaboración propia.

Intervalo	Tiempo [s]	%Dif	Flujo $\left[\frac{L}{s}\right]$
3-2	20	2,05 %	76,875
4-3	20	1,90 %	71,25
5-4	20	1,62 %	60,75
6-5	20	1,53 %	57,375
7-6	40	2,94 %	55,125

Obteniendo que  $F_{6,antes} = 64,275 \left[\frac{L}{s}\right]$ . Por último, se obtuvo que el flujo de agua que entra al colador CH-5 proviene de una bomba de capacidad de 2.000 litros por minuto, es decir, de  $33,33 \left[\frac{L}{s}\right]$ . Todo esto permite calcular el ahorro de fibra útil como sigue:

$$M_{\text{útil,antes}} = \%c_{\text{antes}} \cdot (0,8 \cdot (F_{1,antes} + A_2) - F_{6,antes})$$

$$M_{\text{útil,después}} = \%c_{\text{después}} \cdot (0,8 \cdot (F_{1,después} + A_2) - F_{6,después})$$

$$\%ahorro = \frac{M_{\text{útil,antes}} - M_{\text{útil,después}}}{M_{\text{útil,antes}}}$$

Así, es posible obtener:

$$M_{\text{útil,antes}} = 0,2\% \cdot (0,8 \cdot (51,37 + 33,33) - 64,275) = 0,0069 \left[ \frac{kg}{s} \right]$$

$$M_{\text{útil,después}} = 0,06\% \cdot (0,8 \cdot (34,35 + 33,33) - 30,86) = 0,014 \left[ \frac{kg}{s} \right]$$

Eso implica que hay un aumento en la pérdida de fibra útil en vez de un ahorro. Lo anterior puede ser resumido en las siguientes tablas:

Tabla E.17: Resultados de la Prueba de velocidad en el Espesador según cálculos teóricos. Elaboración propia.

Parámetro	Antes de la prueba (teórico)	Disminución de %cons. (teórico)
%Consistencia de entrada al Espesador $\frac{kg\ fibra}{kg\ total}$	2,56 %	2,14 %
%Consistencia del filtrado antes de cambiar la velocidad $\frac{kg\ fibra}{kg\ total}$	0,2 %	0,2 %
%Consistencia del filtrado después de cambiar la velocidad $\frac{kg\ fibra}{kg\ total}$	–	0,06 %
Velocidad [rpm]	1500	1250
Flujo de entrada al Espesador $\frac{L}{s}$	54,25	64,9
Flujo de filtrado del Espesador $\frac{L}{s}$	32,18	42,17
Flujo de salida del Espesador $\frac{L}{s}$	22,07	22,725
Pérdida másica de fibra útil en filtrado $\frac{kg\ útil}{día}$	2.494,86	978,99

Tabla E.18: Resultados de la Prueba de velocidad en el Espesador según cálculos en terreno. Elaboración propia.

Parámetro	Antes de la prueba	Disminución de consistencia
%Consistencia de entrada al Espesador $\frac{kg\ fibra}{kg\ total}$	2,56 %	2,14 %
%Consistencia del filtrado antes de cambiar la velocidad $\frac{kg\ fibra}{kg\ total}$	0,2 %	0,2 %
%Consistencia del filtrado después de cambiar la velocidad $\frac{kg\ fibra}{kg\ total}$	–	0,06 %
Velocidad [rpm]	1500	1250
Flujo de entrada al Espesador $\frac{L}{s}$	84,7	67,68
Flujo de filtrado del Espesador $\frac{L}{s}$	3,485	23,285
Flujo de salida del Espesador $\frac{L}{s}$	64,275	30,86
Pérdida másica de fibra útil en filtrado $\frac{kg\ útil}{día}$	351,31	704,155

Vale notar que si disminuyera la consistencia de salida de 6 %, disminuiría el flujo de filtrado también (según balance de masa) y, por ende, disminuiría la pérdida de fibra útil. Sin embargo, si se aleja mucho del 6 %, disminuye la eficiencia del resto de la línea, obteniendo una dispersión deficiente y por ende más probabilidades de que el Jumbo tenga stickies.

Para el cálculo de utilidades entregadas con este escenario se utilizaron los flujos volumétricos obtenidos por balance de masa, esto ya que se condicen con lo teórico, es decir, sí se refleja una disminución de fibra en el filtrado ante un cambio en la velocidad del Espesador. Un valor más aterrizado a la operación de la Planta sería volver a tomar los valores de equipos de interés cuando se repita la prueba, ahora en una menor ventana de tiempo para disminuir toda posibilidad de influencia externa en las mediciones.

## Anexo F. Desarrollo de la prueba de cabezal de los Tornillos

La prueba se realizó el lunes 23 de octubre y se tomaron medidas hasta el jueves 26 de octubre, el cabezal se bajó sólo 5 milímetros en vez de los 20 planificados. Esto es por el diseño del Tornillo, ya que el extremo del álabe no permite un mayor descenso, lo que se puede ver en la imagen a continuación:



Figura F.1: Cabezal cónico del Tornillo 50 en uso. Elaboración propia.

La marca roja en la foto indica los 20 milímetros de distancia respecto a la posición inicial, y el álabe no permite bajar hasta ella. La válvula de caudal se mantuvo en 8 centímetros de abertura para ver el efecto respecto al estado anterior del equipo.

Antes de bajar el cabezal, la consistencia de salida de los tornillos era de aproximadamente 11,12% y la del filtrado, 1%. Junto con esto, la consistencia de la pasta que llegaba a la Caja de Nivel era más baja que el estándar, causando que resbalara de los paños hacia el drenaje, añadiendo una pérdida de fibra no despreciable, pero tampoco cuantificable por su imposibilidad de medir.

Inicialmente se utilizó sólo el Tornillo 50, dejándose el Tornillo 51 sin operar. Esto ya que se especuló que, al bajar el cabezal menos de lo deseado, no se vería el efecto en la operación habitual. Veinte minutos después se obtiene la primera muestra de consistencia de salida del Tornillo, siendo de 15,6% y la primera muestra de consistencia de filtrado, siendo de 1,4%. Ante el aumento de consistencia en el filtrado respecto del 1% anterior, se solicita cerrar la válvula de caudal a 7 centímetros, siguiendo lo establecido en el centerline de los Tornillos.

Ante este cambio, la Prensa Doble Tela deja de perder pasta por la Caja de Nivel, resultando en una tela más limpia:



Figura F.2: Tela de la Prensa limpia directamente bajo la caja de nivel.  
Elaboración propia.

Se toma la segunda medida de consistencia, obteniendo que la salida del Tornillo 50 tiene consistencia de 11,78 % y su filtrado, 0,94 %. Si bien se vio una disminución en la consistencia del filtrado, no se consideró significativa.

Una hora después de haber tomado las últimas consistencias, se deja en operación el Tornillo 51 al reflexionar que el Tornillo 50 se encuentra procesando el doble del caudal habitual, lo que implicaría un aumento en la consistencia de los filtrados, por lo que se decide comprobar si la siguiente hipótesis es correcta: Si se deja en operación ambos tornillos los valores debieran mejorar, ya que en la situación actual el Tornillo 50 se encuentra procesando el doble de caudal y al tener velocidad constante no logra una filtración efectiva.

Las primeras muestras de consistencia tomadas luego de este cambio resultaron en 15,23 % en la salida de los Tornillos y 0,72 % en el filtrado, presentando cambios más significativos en ambos.

En el segundo día de mediciones, se llegó a la siguiente distribución de consistencias:

Tabla F.1: Medidas de consistencia de salida de los Tornillos el segundo día. Elaboración propia.

Salida Tornillos		
Hora	Consistencia $\frac{kg_{fibra}}{kg_{total}}$	Comentario
8:30	18,66 %	T51
8:30	25,24 %	T50
12:00	14,84 %	T51
12:00	22,20 %	T50
13:30	16,62 %	T51
13:30	22,20 %	T50
15:00	18,86 %	T51
15:00	24,06 %	T50
16:00	14,80 %	T51
16:00	18,70 %	T50
19:10	18,10 %	Total
20:10	11,20 %	Total
22:00	18,20 %	Total
23:30	20,70 %	Total
1:10	17,30 %	Total
4:00	18,40 %	Total
<b>Prom. T50</b>	<b>19,66 %</b>	
<b>Prom.T51</b>	<b>17,06 %</b>	

Tabla F.2: Medidas de consistencia del filtrado de los Tornillos el segundo día. Elaboración propia.

Filtrado Tornillos		
Hora	Consistencia $\frac{kg_{fibra}}{kg_{total}}$	Comentario
8:30	0,66 %	
12:00	1,28 %	Niveles altos en el tanque previo al equipo.
13:30	1,22 %	
15:00	0,76 %	Obtenida por registro.
16:00	0,76 %	
19:10	0,90 %	
20:10	0,90 %	
22:00	0,60 %	
23:30	0,80 %	
1:10	0,50 %	
4:00	0,50 %	
<b>Promedio</b>	<b>0,81 %</b>	

El día 25 de octubre, tercer día de mediciones, no se pudieron tomar tantas medidas como el día anterior debido a problemas con la línea, particularmente con el Espesador de Papel Viejo, el cual se dejó en bypass. Esto disminuyó la consistencia de entrada a los Tornillos y también la consistencia de salida, lo que disminuyó el promedio. Las mediciones se detallan a continuación:

Tabla F.3: Medidas de consistencia a la salida de los Tornillos del tercer día. Elaboración propia.

Salida Tornillos		
Hora	Consistencia $\frac{kg_{fibra}}{kg_{total}}$	Comentario
8:30	8,10 %	T51
8:30	8,22 %	T50
12:00	9,98 %	T51
12:00	10,66 %	T50
1:00	15,36 %	T51
1:00	17,30 %	T50
2:00	14,62 %	T51
2:00	17,40 %	T50
<b>Promedio T50</b>	<b>13,40 %</b>	
<b>Promedio T51</b>	<b>12,02 %</b>	

Tabla F.4: Medidas de consistencia del filtrado de los Tornillos del tercer día. Elaboración propia.

Filtrado Tornillos		
Hora	Consistencia $\frac{kg_{fibra}}{kg_{total}}$	Comentario
8:30	0,42 %	
12:00	0,54 %	
1:00	0,36 %	
2:00	1,04 %	
<b>Promedio</b>	<b>0,59 %</b>	

En el cuarto día, 26 de octubre, se tomaron las siguientes medidas:

Tabla F.5: Medidas de consistencia a la salida de los Tornillos del cuarto día. Elaboración propia.

Salida Tornillos		
Hora	Consistencia $\frac{kg_{fibra}}{kg_{total}}$	Comentario
8:30	8,10 %	T51
8:30	8,22 %	T50
12:00	9,98 %	T51
12:00	10,66 %	T50
1:00	15,36 %	T51
1:00	17,30 %	T50
2:00	14,62 %	T51
2:00	17,40 %	T50
<b>Promedio T50</b>	<b>13,40 %</b>	
<b>Promedio T51</b>	<b>12,02 %</b>	

El mismo día se obtuvieron las siguientes medidas para el filtrado de los Tornillos:

Tabla F.6: Medidas de consistencia del filtrado de los Tornillos el cuarto día. Elaboración propia.

Filtrado Tornillos		
Hora	Consistencia $\frac{kg_{fibra}}{kg_{total}}$	Comentario
7:30	0,48 %	Registro.
11:25	0,60 %	
11:45	0,36 %	
15:00	0,86 %	
16:00	0,68 %	Registro.
23:30	0,78 %	
3:00	0,68 %	
4:40	1,12 %	
6:10	1,06 %	
<b>Promedio</b>	<b>0,74 %</b>	

También se estudió el efecto en la Prensa Doble Tela al notar que el agua filtrada salía más clara en comparación al Tornillo sin cabezal. Se obtuvieron las siguientes mediciones:

Tabla F.7: Medidas de consistencia del filtrado de la Prensa Doble Tela. Elaboración propia.

Drenaje PDT			
Hora	Consistencia	$\frac{kg_{fibra}}{kg_{total}}$	Comentario
7:30	0,04 %		
11:25	0,04 %		
15:00	0,16 %		
16:00	0,02 %		Registro.
23:30	0,04 %		
3:00	0,04 %		
4:40	0,56 %		
<b>Promedio</b>	<b>0,14 %</b>		

Por último, se consultó el registro del resto de días que se fabricó la receta de estudio:

Tabla F.8: Consistencias del filtrado de los Tornillos obtenidas por registro los últimos días de fabricación de la receta estudiada. Elaboración propia.

Filtrado Tornillos			
Fecha - Hora	Consistencia	$\frac{kg_{fibra}}{kg_{total}}$	Comentario
27-10 7:30	0,96 %		Válvula del T51 en 8 cm.
27-10 15:30	0,9 %		Válvula del T51 en 8 cm.
17-10 23:30	0,71 %		
28/10 15:30	0,4 %		Válvula del T51 en 8 cm.
28/10 23:30	0,63 %		
29/10 7:30	1,02 %		Válvula del T51 en 8 cm.
29/10 15:30	0,9 %		Válvula del T51 en 8 cm.
<b>Promedio</b>	<b>0,79 %</b>		

Tabla F.9: Consistencias del filtrado de la Prensa Doble Tela obtenidas por registro los últimos días de fabricación de la receta de estudio. Elaboración propia.

Filtrado PDT		
Fecha - Hora	Consistencia $\frac{kg_{fibra}}{kg_{total}}$	Comentario
27-10 7:30	0,36 %	Válvula del T51 en 8 cm.
27-10 15:30	0,3 %	Válvula del T51 en 8 cm.
17-10 23:30	0,04 %	
28/10 15:30	0,2 %	Válvula del T51 en 8 cm.
28/10 23:30	0,06 %	
29/10 7:30	0,34 %	Válvula del T51 en 8 cm.
29/10 15:30	0,1 %	Válvula del T51 en 8 cm.
<b>Promedio</b>	<b>0,2 %</b>	

Este último valor promedio es menor al que se obtuvo en mediciones anteriores, el cual correspondía a 0,8 % y también es menor que el rango establecido por centerline, que es 0,4 % – 0,8 %. Vale notar que al subir una válvula de los 7 centímetros especificados por centerline, también sube la consistencia del filtrado de la Prensa Doble Tela.

Al notar los efectos en la Prensa Doble Tela anteriormente mencionados, se estudió también el efecto en la consistencia de entrada al Disperguer, cuya condición de operación es que la pasta a la entrada debe tener, al menos, 30 % de consistencia. Anteriormente, esta consistencia era alrededor de 27 % – 30 %, pero luego de bajar el cabezal, la consistencia aumentó a 30 % – 33 %. El gráfico de tendencias la potencias del disperguer se presenta a continuación:

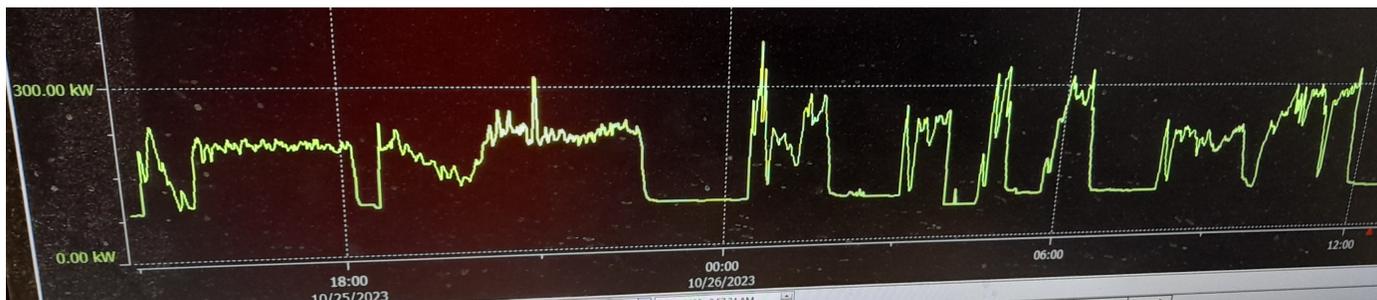


Figura F.3: Distribución de uso de potencias del Disperguer. Elaboración propia.

Como se puede ver, existe un aumento de potencia cuando la línea está en servicio, superando el límite de 300 [kW] seis veces en la operación. Esto significa que está utilizando más energía para su procesamiento, lo que concuerda con el aumento de consistencia de entrada al equipo, obteniendo una dispersión más eficiente.

Se estudió también el efecto en la bomba de alta consistencia, obteniéndose la siguiente distribución de consistencias:

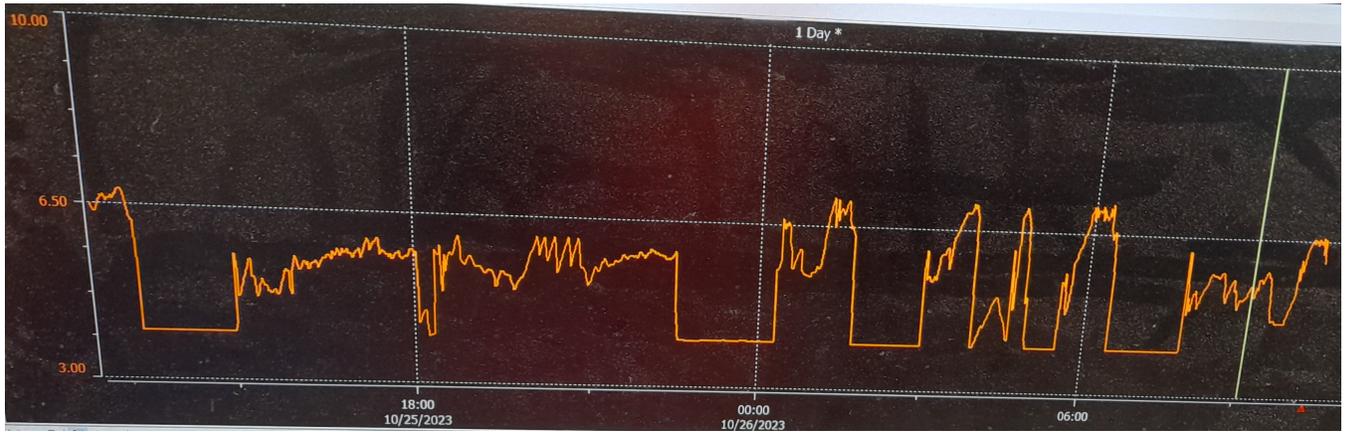


Figura F.4: Distribución de consistencias en la Bomba de alta consistencia en un día. Elaboración propia.

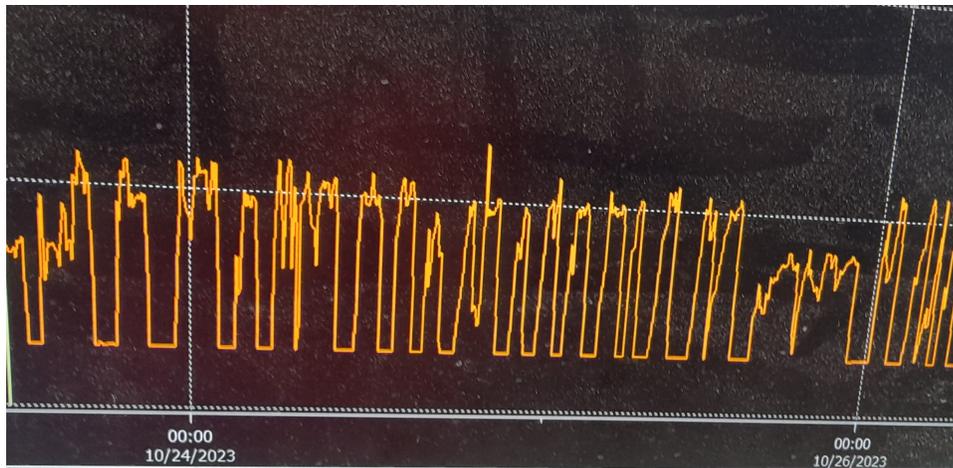


Figura F.5: Distribución de consistencias en la Bomba de alta consistencia por la duración de la prueba. Elaboración propia.

Antes de la prueba, el máximo valor a la que llegaba la consistencia era de 6 %, posterior a la bajada del cabezal se llegó a 7 %. Esto implica un mayor tonelaje de trabajo en la Prensa Doble Tela, ya que el flujo másico está dado por:

$$M \left[ \frac{\text{ton}}{\text{día}} \right] = Q \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \right] \cdot \%C \left[ \frac{\text{ton}}{\text{m}^3} \right]$$

Recordando que, si bien la consistencia se mide en  $[\text{gr}/\text{mL}]$ , su valor es equivalente en  $[\text{ton}/\text{m}^3]$  ya que:

$$\frac{\text{gr}}{\text{mL}} \cdot \frac{1\text{kg}}{1000\text{gr}} = \frac{\text{kg}}{\text{L}} \cdot \frac{1\text{ton}}{1000\text{kg}} = \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}$$

Luego, aumenta el flujo de trabajo de la Bomba, y por ende aumenta el tonelaje que llega al Disperguer.

Por último, se tomó la corriente del tornillo en servicio y en vacío con el fin de ver el efecto

del cabezal en el Tornillo 50.

Tabla F.10: Valores de corriente en Tornillo 50 con el cabezal instalado. Elaboración propia.

Tornillo	Corriente Nominal [A]	Corriente en vacío [A]	Corriente en servicio [A]	Porcentaje respecto a nominal	$\frac{Corriente_{uso}}{Corriente_{nominal}}$
T-50	39	20	19	48% - 51%	

Esto indica que, como su porcentaje respecto a la corriente nominal es menor al 75 %, se podría añadir a este escenario la instalación de un variador de frecuencia.

Finalmente, se tomó la medida del nuevo flujo de filtrado según la siguiente metodología:

1. Abrir la válvula de bypass del filtrado de los Tornillos 50-51 al tanque externo.
2. Cerrar la válvula del filtrado de los Tornillos 50-51 al tanque de agua fibrosa.
3. Cerrar la Bomba intermedia que lleva la salida del tanque de agua fibrosa al tanque externo.
4. Cerrar la Bomba que extrae flujo del tanque externo.
5. Revisar el nivel del tanque externo en el DCS cuando se termina de ejecutar los pasos anteriores.
6. Registrar el porcentaje de llenado del tanque y la hora de la medición.

El flujo se midió dos días en separado cuando se fabricaba la receta de estudio, en que las válvulas de abertura estaban en 8 centímetros el primer día y 7 centímetros el segundo. Los resultados se presentan a continuación:

Tabla F.11: Medidas de nivel de tanque externo cuando las válvulas están en 8 centímetros. Elaboración propia.

Hora de inicio	Porcentaje tanque	$\frac{V_{llenado}}{V_{tanque}}$
10:26:25	62,12 %	
10:27:24	70,49 %	
10:28:01	74,11 %	
10:28:24	76,13 %	

Tabla F.12: Medidas de nivel de tanque externo cuando las válvulas están en 7 centímetros. Elaboración propia.

Hora de inicio	Porcentaje tanque	$\frac{V_{llenado}}{V_{tanque}}$
10:39:08	40,96 %	
10:40:09	45,71 %	
10:41:08	50,48 %	
10:41:39	52,90 %	
10:42:09	55,18 %	

Para obtener este valor en flujo, se utilizó la siguiente ecuación:

$$F \left[ \frac{L}{s} \right] = \frac{\%Final_{llenado} - \%Inicial_{llenado}}{t_{llenado}[s]} \cdot V_{tanque} [m^3] \cdot \frac{1000[L]}{1[m^3]}$$

El Volumen del tanque externo es de 45 metros cúbicos, y el tiempo de llenado se calculó como los segundos de diferencia entre dos mediciones. Así, se obtuvo lo siguiente:

Tabla F.13: Flujo volumétrico del filtrado de los Tornillos con válvulas en 8 centímetros. Elaboración propia.

Intervalo	Tiempo [s]	Dif. %	Dif. % en vol. [m <sup>3</sup> ]	Flujo $\left[ \frac{L}{s} \right]$
2-1	59	8,37 %	3,77	63,84
3-2	37	3,62 %	1,63	44,03
4-3	23	2,02 %	0,91	39,52
3-1	96	11,99 %	5,40	56,20
4-2	60	5,64 %	2,54	42,3
4-1	119	14,01 %	6,30	52,98

Tabla F.14: Flujo volumétrico del filtrado de los Tornillos con válvulas en 7 centímetros. Elaboración propia.

Intervalo	Tiempo [s]	Dif. %	Dif. % en vol. [m <sup>3</sup> ]	Flujo $\left[ \frac{L}{s} \right]$
3-2	59	4,77 %	2,15	36,38
4-3	31	2,42 %	1,09	35,13
3-1	120	9,52 %	4,28	35,70
4-2	90	7,19 %	3,24	35,95
4-1	151	11,94 %	5,37	35,58
5-4	30	2,28 %	1,03	34,20
5-3	61	4,70 %	2,12	34,67
5-2	120	9,47 %	4,26	35,51
5-1	181	14,22 %	6,40	35,35

Posteriormente se tomaron los promedios de estos flujos y, utilizando la nueva consistencia obtenida y el mismo porcentaje de fibra útil obtenido a principios de año (80,80 %), se obtuvo lo siguiente:

Tabla F.15: Flujos máxicos obtenidos a partir de mediciones con válvulas en 8 y en 7 centímetros. Elaboración propia.

Válvulas	Flujo máxico $\frac{kg}{hr}$
En 8 centímetros	1.086,69
En 7 centímetros	771,24

Con el flujo anterior de pérdida siendo de 29,15 Litros por segundo, que implica una pérdida máxica de fibra útil de 847,91 kilogramos por hora ya que el porcentaje de fibra útil es de 80,8% y la consistencia promedio, de 1%. Si mantenemos el porcentaje de fibra útil y utilizamos la consistencia promedio de filtrado de tornillos después de la prueba, se obtiene lo siguiente en comparación con el flujo anterior de pérdida:

Tabla F.16: Diferencia de kilogramos útiles en filtrados obtenidos a partir de mediciones con válvulas en 8 y en 7 centímetros. Elaboración propia.

Válvulas	Ahorro $\frac{kg}{hr}$
En 8 centímetros	-238,77
En 7 centímetros	76,67

Es decir, si las válvulas se mantienen en 7 centímetros existe un ahorro de fibra útil, pero si se aumenta el caudal a 8 centímetros, existe una pérdida de fibra adicional.

Al haber cambios en la consistencia de entrada a la Bomba de alta consistencia y también en la de entrada al Disperguer, se especula un cambio en el flujo de filtrado de la Prensa Doble Tela. Para ello se estableció el siguiente balance de masa:

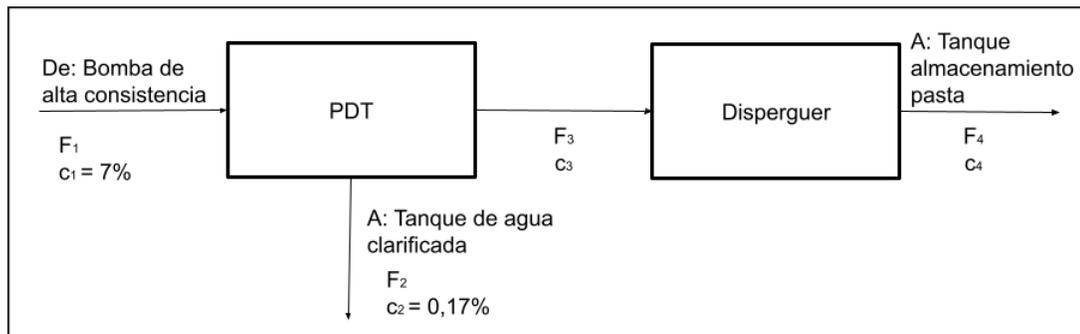


Figura F.6: Balance de masa en Disperguer y Prensa Doble Tela. Elaboración propia.

En que  $F_i$  son los flujos volumétricos en litros por segundo y  $c_i$  las consistencias en % kilogramos por litro. Al momento de la medición el sensor de flujo de la Bomba se encontraba fuera de servicio por avería en el equipo, por lo que se utilizó el rango de trabajo conocido de 1.600 – 1.800 litros por minuto. Como no existe pérdida de agua ni de masa en el disperguer, se tiene que:

$$F_3 \cdot c_3 = F_4 \cdot c_4 \leftrightarrow F_3 = F_4$$

Esto es sin considerar el flujo de agua a la entrada del Disperguer, que no es posible de medir por falta de instrumentación; además de que su entrada de agua fue informada muy adentrado en la realización del trabajo. Por otro lado, es posible medir  $F_4$  utilizando el sensor de nivel del tanque de almacenamiento y cerrando su bomba de salida. Al hacer esto se obtuvieron las siguientes mediciones:

Tabla F.17: Mediciones de nivel de tanque de almacenamiento. Elaboración propia.

Tiempo	%Tanque	$\frac{V_{llenado}}{V_{tanque}}$
3:07:17	52,47 %	
3:10:18	55,60 %	
3:11:17	56,61 %	
3:15:17	60,83 %	
3:17:18	62,87 %	
3:19:18	64,75 %	
3:21:17	67,08 %	
3:23:18	69,33 %	
3:30:17	75,55 %	
3:32:18	76,88 %	

Que resulta en los siguientes flujos:

Intervalo	Segundos	Llenado [m <sup>3</sup> ]	Flujo $\frac{L}{s}$
2-1	181	1,5963	8,82
3-2	59	0,5151	8,73
4-3	240	2,1522	8,97
5-4	121	1,0404	8,60
6-5	120	0,9588	7,99
7-6	119	1,1883	9,99
8-7	121	1,1475	9,48
9-8	419	3,1722	7,57
10-9	121	0,6783	5,61
3-1	240	4,14 %	8,80
4-1	480	8,36 %	8,88
5-1	601	10,40 %	8,83
6-1	721	12,28 %	8,69
7-1	840	14,61 %	8,87
8-1	961	16,86 %	8,95
9-1	1380	23,08 %	8,53
10-1	1501	24,41 %	8,29
4-2	299	5,23 %	8,92

5-2	420	7,27 %	8,83
6-2	540	9,15 %	8,64
7-2	659	11,48 %	8,88
8-2	780	13,73 %	8,98
9-2	1199	19,95 %	8,49
10-2	1320	21,28 %	8,22
5-3	361	6,26 %	8,84
6-3	481	8,14 %	8,63
7-3	600	10,47 %	8,90
8-3	721	12,72 %	9,00
9-3	1140	18,94 %	8,47
10-3	1261	20,27 %	8,20
6-4	241	3,92 %	8,30
7-4	360	6,25 %	8,85
8-4	481	8,50 %	9,01
9-4	900	14,72 %	8,34
10-4	1021	16,05 %	8,02
7-5	239	4,21 %	8,98
8-5	360	6,46 %	9,15
9-5	779	12,68 %	8,30
10-5	900	14,01 %	7,94
8-6	240	4,58 %	9,73
9-6	659	10,80 %	8,36
10-6	780	12,13 %	7,93
9-7	540	8,47 %	8,00
10-7	661	9,80 %	7,56
10-8	540	7,55 %	7,13

Tabla F.18: Flujo volumétrico de salida del Disperguer. Elaboración propia.

De esto es posible obtener:

$$F_4 = F_{prom} = 8,56 \left[ \frac{L}{s} \right]$$

Lo que por balance de masa anterior sabemos que implica:

$$F_3 = F_4 = 8,56 \left[ \frac{L}{s} \right]$$

Obtenemos un rango para  $F_1$ :

$$F_{1,min} = 1.600 \left[ \frac{L}{min} \right] \cdot \frac{1[min]}{60[seg]} \approx 26,67 \left[ \frac{L}{s} \right]$$

$$F_{1,max} = 1.800 \left[ \frac{L}{min} \right] \cdot \frac{1[min]}{60[seg]} = 30 \left[ \frac{L}{s} \right]$$

Por balance de flujo volumétrico a la Prensa Doble Tela se tiene que:

$$F_1 = F_2 + F_3$$

Obtenemos  $F_1$  promedio:

$$F_{1,prom} = \frac{F_{1,min} + F_{1,max}}{2} = 28,335 \left[ \frac{L}{s} \right]$$

Así:

$$28,335 \left[ \frac{L}{s} \right] = F_2 + 8,56 \left[ \frac{L}{s} \right] \leftrightarrow F_2 = 19,775 \left[ \frac{L}{s} \right]$$

Lo que es una disminución respecto a las mediciones tomadas a principio de año, en que el Flujo de filtrado de la Prensa correspondía a 22,63 litros por segundo; esto tiene sentido debido a que se aumentó la consistencia a la entrada, por lo que se debe extraer una menor cantidad de agua para obtener la consistencia deseada. Suponiendo el mismo porcentaje de fibra útil, los kilos de fibra útil que salen por el drenaje de la PDT corresponden a:

$$M_{util} = F_2 \left[ \frac{L}{s} \right] \cdot 0,17\% \left[ \frac{kg_{fibra}}{L} \right] \cdot \%_{util} \left[ \frac{kg_{util}}{kg_{fibra}} \right]$$

Lo calculamos en kilogramos por día considerando 14 horas de trabajo por día, obteniendo una disminución de aproximadamente el 79% respecto al valor de pérdida anterior.

Luego de bajar el cabezal 5 milímetros, la consistencia de salida del Tornillo con cabezal es de 16,64% y la del Tornillo 51, sin cabezal, es de 15,06%; esto considerando todos los días de la prueba; y por otro lado, la consistencia del filtrado promedio resultó en 0,76%; además de aumentar a 35,35 litros por segundo el filtrado. Con esto, la pérdida de fibra útil disminuye un 9,04% si se mantienen las válvulas en 7 centímetros. Se especula que la instalación de un segundo cabezal disminuirá la consistencia del filtrado a 0,6%, lo que resultaría en una disminución del 27% respecto al valor original.

Sumado a esto, se tiene una disminución de la consistencia de salida de la Prensa Doble Tela de 0,8% de medidas anteriores a 0,17%; esto significa una disminución de pérdida de fibra útil en el equipo de un 78,75%.

## Anexo G. Memoria de cálculo: Factor de emisión de residuos de pasta

Se tiene que por cada tonelada de producción se emiten 55 kgCO<sub>2</sub>eq [47]. Se utiliza la pérdida de fibra útil teórica:

- Pérdida para fibra celulósica: 6 %.
- Pérdida para fibra reciclada: 35 %.

Luego, el papel producido será de 100 % - %perdida para cada fibra. Por ende, se puede deducir que para una tonelada de cada papel procesado en la entrada se obtiene:

$$1[ton_{celulosa}] \cdot \frac{94[ton_{fibra}]}{100[ton_{celulosa}]} = 0,94[ton_{fibra}] = 940[kg_{fibra}]$$

$$1[ton_{reciclado}] \cdot \frac{65[ton_{fibra}]}{100[ton_{reciclado}]} = 0,65[ton_{fibra}] = 650[kg_{fibra}]$$

Suponiendo el proceso de elaboración de papel como una caja negra, se obtiene que:

$$F_{papel} = F_{celulosa} + F_{reciclado}$$

$$\leftrightarrow F_{papel} = 940 + 650 = 1590[kg]$$

Es decir, cada 2000 kilogramos totales a la entrada (1 tonelada de celulosa + 1 tonelada de reciclado) se producen 1590 kilogramos de papel mixto. Con una regla de tres se obtiene que:

$$\begin{array}{r} 2000 \text{ kg}_{entrada} \quad 1590 \text{ kg}_{papel} \\ x \text{ kg}_{entrada} \quad 1000 \text{ kg}_{papel} \end{array}$$

$$\rightarrow x[kg_{entrada}] = \frac{2000[kg_{entrada}] \cdot 1000[kg_{papel}]}{1590[kg_{papel}]}$$

$$\leftrightarrow x = 1257[kg_{entrada}]$$

Luego el factor corresponde a:

$$55 \frac{kgCO_2eq}{1000kg_{papel}} = 55 \frac{kgCO_2eq}{1257kg_{entrada}} \approx 43,75 \frac{kgCO_2eq}{kg_{entrada}}$$

Se considera que toda la fibra utilizada para obtener el producto es útil, por lo que:

$$f_{util} = 43,75 \frac{kgCO_2eq}{kg_{util}}$$

## Anexo H. Memoria de cálculo: Factor de emisión de consumo de agua

El agua utilizada por los procesos de preparación pasta en Softys es tratada y clarificada en la misma planta, por lo que se buscó un análisis de ciclo de vida para una planta de tratamiento de agua. Cabe mencionar que el análisis encontrado corresponde al de una Planta de tratamiento de agua potable, en que recoge agua, utiliza lodos activados, hace el tratamiento correspondiente, purifica el agua obtenida y luego la redistribuye a la red [49]. Cada una de estas etapas tiene su factor asociado:

Tabla H.1: Factores de emisión en el proceso tratamiento de agua potable según sus fases [49]

Fase	Factor [ $kgCO_2eq/UnidadFuncional$ ]
Recolección	295,7
Lodos Activados	295,7
Tratamiento	28,2
Purificación	166,6
Redistribución	283,2

Como en Softys no se necesita potabilizar el agua de procesos, se descarta la fase de lodos activados y purificación. Así, se tiene un factor total de:

$$f_w = (295,7 + 28,2 + 283,2) \left[ \frac{kgCO_2eq}{Unidad} \right] = 607,1 \left[ \frac{kgCO_2eq}{Unidad} \right]$$

La unidad funcional del estudio corresponde a  $1500 m^3$  [49], por lo que lo normalizamos:

$$f_w = \frac{607,1[kgCO_2eq]}{1500[m^3]} \approx 0,405 \left[ \frac{kgCO_2eq}{m^3} \right]$$

## Anexo I. Memoria de cálculo: Ratio ambiental

El Ratio está dado por el cociente del beneficio ambiental en kilogramos de CO<sub>2</sub>eq; y el costo de la alternativa en miles de dólares. El beneficio ambiental está dado por:

$$Beneficio = Emisiones_{antes} - Emisiones_{después}$$

Las emisiones consideran consumo de electricidad, agua y disposición de la fibra que no se ahorra, es decir:

$$E_{electricidad} = 300,6 \left[ \frac{kgCO_2eq}{MWh} \right] \cdot t_{op} \left[ \frac{hr}{año} \right] \cdot Consumo_{electricidad}[MW]$$

$$E_w = 0,405 \left[ \frac{kgCO_2eq}{m^3} \right] \cdot t_{op} \left[ \frac{hr}{año} \right] \cdot Consumo_w \left[ \frac{m^3}{hr} \right]$$

$$E_{fibra,antes} = 43,755 \left[ \frac{kgCO_2eq}{ton_{util}} \right] \cdot M_{util} \left[ \frac{ton_{util}}{hr} \right] \cdot t_{op} \left[ \frac{hr}{año} \right]$$

Particularmente, para el caso de las emisiones de fibra después de la implementación de la alternativa, se tiene:

$$E_{fibra,después} = 43,755 \left[ \frac{kgCO_2eq}{ton_{util}} \right] \cdot (1 - \%ahorro) \cdot M_{util} \left[ \frac{ton_{util}}{hr} \right] \cdot t_{op} \left[ \frac{hr}{año} \right]$$

Así, el beneficio estará dado por:

$$B_{ambiental} \left[ \frac{kgCO_2eq}{año} \right] = (E_{electricidad,antes} - E_{electricidad,después}) + (E_{w,antes} - E_{w,después}) \\ + (E_{fibra,antes} - E_{fibra,después})$$

$$\Leftrightarrow \left( 300,6 \left[ \frac{kgCO_2eq}{MWh} \right] \cdot t_{op} \left[ \frac{hr}{año} \right] \cdot (Consumo_{electricidad,antes} - Consumo_{electricidad,después}[MW]) \right) \\ + \left( 0,405 \left[ \frac{kgCO_2eq}{m^3} \right] \cdot t_{op} \left[ \frac{hr}{año} \right] \cdot (Consumo_{w,antes} - Consumo_{w,después}) \left[ \frac{m^3}{hr} \right] \right) \\ + \left( 43,755 \left[ \frac{kgCO_2eq}{ton_{util}} \right] \cdot \%ahorro \cdot M_{fibra} \left[ \frac{ton_{fibra}}{hr} \right] \cdot \%útil \left[ \frac{ton_{util}}{ton_{fibra}} \right] \cdot t_{op} \left[ \frac{hr}{año} \right] \right)$$

Luego, el Ratio estará dado por:

$$Ratio_{ambiental} = \frac{B_{ambiental} \left[ \frac{kgCO_2eq}{año} \right]}{Costo[USD]}$$