



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

OPTIMIZACIÓN DEL USO DE AGENTES DE RESISTENCIA EN MÁQUINAS
PAPELERAS – CASO REAL CMPC TISSUE PLANTA PUENTE ALTO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL QUÍMICO

MARCELO MAXIMILIANO GONZÁLEZ MARTÍNEZ

PROFESOR GUÍA:

FRANCISCO GRACIA CAROCA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

HUMBERTO PALZA CORDERO

ANGELO CASTELLO BELMAR

SANTIAGO, CHILE

2017

RESUMEN PARA OPTAR AL TITULO DE:
Ingeniero Civil Químico
POR: Marcelo González Martínez
FECHA: 06/07/2017
PROFESOR GUÍA: Francisco Gracia Caroca

OPTIMIZACIÓN DEL USO DE AGENTES DE RESISTENCIA EN MÁQUINAS PAPELERAS – CASO REAL CMPC TISSUE PLANTA PUENTE ALTO

El papel Tissue es un tipo especial de papel de uso sanitario y doméstico. Se caracteriza por su alta suavidad, bajo gramaje y gran capacidad de absorción. Los papeles Tissue incluyen al papel higiénico, servilletas, toallas y pañuelos.

El presente trabajo se desarrolla en la multinacional CMPC Tissue S.A. Esta empresa es la segunda mayor productora de papel Tissue a nivel latinoamericano y la octava a nivel mundial. Cuenta con dos plantas productivas en Chile, una en la comuna de Talagante y otra en la comuna de Puente Alto, ambas pertenecientes a la región Metropolitana.

Desde principios de 2016, CMPC Tissue, planta Puente alto, ha experimentado un creciente uso de agentes de resistencia con motivo de mantener las propiedades mecánicas del papel. Este sobreconsumo ha elevado los costos productivos en más de US\$5000 al mes.

El objetivo de este trabajo es disminuir el consumo de agentes de resistencia en las dos líneas productivas de CMPC Tissue, planta Puente Alto. Para esto se cuenta con; un medidor de carga de partículas, total acceso al proceso productivo y un periodo máximo de seis meses.

La metodología utilizada consiste en cuantificar los niveles de demanda iónica en los principales papeles de cada línea productiva, comparar este valor con lo reportado en bibliografía y proponer e implementar mejoras en los papeles identificados con problemas. En adición a esto, se implementa un sistema de capacitación y control enfocado a disminuir el consumo de los agentes de resistencia.

El presente trabajo disminuyó el consumo de agente de resistencia en húmedo en el 57% de servilletas y toallas. Los papeles optimizados con éxitos fueron la servilleta 1R, servilleta 1T, la toalla 1 y la Sabanilla. Por otra parte, el consumo de agente de resistencia en seco total en la planta, en el trimestre diciembre, enero y febrero, disminuyó un 27% respecto al trimestre anterior.

Finalmente, se proyecta que el beneficio económico consecuencia del proceso de optimización llega, en un escenario esperado, a los US\$ 66.000 al año. Este valor representa el costo total de producción de un día de operación de la máquina papelera N°2 y es mayor al aumento de costos que tuvo la planta a principios de 2016.

Agradecimientos

Mamá y Papá: Son increíbles, realmente increíbles. Espero poder hacer tan felices a mis hijos como ustedes lo hicieron conmigo. He sentido su apoyo siempre, hacen parecer todo fácil. Los amo y espero tenerlos siempre junto a mí.

Agradezco a mi familia por siempre tratarme con cariño y respeto. Sería injusto nombrar a alguien en especial, tengo una familia maravillosa en su totalidad.

Agradezco a Natalia por haberme acompañado todos estos años, gracias por todo el cariño que siempre me demuestras y gracias por hacerme sentir especial todos los días.

Agradezco a Sebastián y Paula por apoyarme y estar presente en TODOS los buenos y malos momentos.

Agradezco a los Ponys + Nico F por tantos momentos de risa, extraño no verlos a diario y almorzar con ustedes.

Agradezco a mis amigos de sección, gracias por el cariño que me entregan cuando los veo.

Mencion honrosa a GruPET el mejor grupo de trabajo que tendré en mi vida. Nati. Mavri y Stefan.

Agradezco a mi comisión por darme la oportunidad de desarrollar mi memoria y abrirme las puertas del mundo laboral.

Agradezco a mis gatitos.

Agradezco todo lo que ha pasado en mi vida.

Tabla de Contenido

1	Introducción.....	1
1.1	Objetivos generales	2
1.2	Objetivos específicos	2
2	Marco teórico.....	3
2.1	Empresa.....	3
2.2	Materia prima	3
2.2.1	Celulosa (Fibra virgen).....	4
2.2.2	Papelotes (fardo de papel reciclado)	4
2.3	Proceso de producción de papel Tissue.	5
2.3.1	Preparación pasta.....	5
2.3.2	Formación y secado en maquina papelera	9
2.3.3	Conversión rollo.....	10
2.4	Suspensión papelera	11
2.4.1	Fibras.....	11
2.4.2	Finos.....	11
2.4.3	Agua	11
2.4.4	Basura aniónica o coloidal	12
2.5	Aditivos Químicos	12
2.5.1	Aditivos de proceso.....	12
2.5.2	Aditivos químicos funcionales	12
2.6	Demanda iónica	13
2.6.1	Demanda iónica fibras de celulosa	14
2.6.2	Demanda iónica sistema coloidal de una suspensión papelera.....	14
2.6.3	Medición de la demanda iónica del sistema coloidal	15
2.5.4	Propiedades mecánicas del papel	16
3	Proceso productivo y requerimientos de la empresa.....	18
3.1	Diagrama proceso productivo CMPC Tissue, planta Puente Alto	18
3.1.1	Línea de producción máquina papelera N°1	18
3.1.2	Línea de producción máquina papelera N°2.....	19

3.2	Requerimientos de la empresa	20
4	Estudio niveles de demanda iónica en ambas líneas productivas.....	21
4.1	Objetivo	21
4.2	Metodología	21
4.3	Materiales	21
4.4	Muestreo y medición	21
4.5	Resultados esperados	22
4.6	Resultados y discusiones.....	23
4.6.1	Demanda iónica línea de producción máquina papelera N°1	24
4.6.2	Demanda iónica línea de producción máquina papelera N°2	30
5	Optimización del consumo de agentes de resistencia en papeles identificados con problemas de demanda iónica	34
5.1	Servilleta 1T	34
5.1.1	Requerimientos.....	34
5.1.2	Resultados y discusiones	35
5.2	Sabanilla	39
5.2.1	Metodología de optimización de agentes de resistencia.....	39
5.2.2	Resultados y discusiones	41
6	Optimización del consumo agentes de resistencia en papeles sin problemas de demanda iónica.....	42
6.3	Resultados y discusiones.....	43
6.3.1	Toalla 1	43
6.3.2	Servilleta Elite 1R.....	45
6.3.3	Toalla 3	47
6.3.4	Optimización en el consumo de almidón.	48
7	Impacto y proyección económica	50
7.1	Impacto económico: intervención en la dosificación.	50
7.2	Impacto económico: Adquisición de un removedor de basura aniónica.....	52
8	Conclusiones.....	55
9	Bibliografía	56
10	Anexos	59
	Anexo A: Memoria de cálculo consumo específico de aditivos	59
	Anexo B: Ejemplo de medición y cálculo de demanda catiónica	60

Anexo C: Medición calidad de fibra.....	61
Anexo D: Optimización Sabanilla.....	62
Anexo E: Planilla Excel consumo específicos.....	65
Anexo F: Planilla de Control.....	67
Anexo G: Impacto y proyección económica.....	67
Anexo H: Análisis técnico económico de las propuestas de mejora.....	68

Índice de Figuras

Figura 1: Grúa Horquilla desplazando un papelote dentro del patio de materias primas.	5
Figura 2: Pulper de uso industrial utilizado en la fabricación de papel.	6
Figura 3: Funcionamiento de un depurador ciclónico.	7
Figura 4: Dispensador utilizado en la fabricación de papel.	8
Figura 5: Fibra sin refinar (izquierda) fibra refinada (derecha).	8
Figura 6: Diagrama circuito de aproximación.	9
Figura 7: Circuito de pasta máquina papelera <i>Duo Former</i> .	10
Figura 8: Circuito de pasta máquina papelera <i>Fourdrinier</i> .	10
Figura 9: Líneas convertidoras de papel Tissue.	11
Figura 10: Reordenamiento iónica alrededor de un coloide.	15
Figura 11: Funcionamiento del Mutek PCD03.	16
Figura 12: Diagrama de flujos línea máquina papelera N°1.	18
Figura 13: Diagrama de flujos línea máquina papelera N°2.	19
Figura 14: Perfil demanda catiónica línea máquina papelera N°1.	22
Figura 15: Perfil demanda catiónica higiénico 1.	24
Figura 16: Perfil demanda catiónica higiénico 2.	26
Figura 17: Perfil demanda catiónica servilleta 1R.	27
Figura 18: Perfil demanda aniónica Sabanilla.	29
Figura 19: Demanda catiónica toalla 1.	30
Figura 20: Demanda catiónica toalla 2.	31
Figura 21: Demanda catiónica servilleta 1T.	32
Figura 22: Resistencia longitudinal servilleta 1T ante cambios en la dosificación de agentes de resistencia.	36
Figura 23: Resistencia transversal servilleta 1T ante cambios en la dosificación de agentes de resistencia.	36
Figura 24: Resistencia en húmedo servilleta 1T ante cambios en la dosificación de agentes de resistencia.	37
Figura 25: Consumo específico de agentes de resistencia servilleta 1T.	37
Figura 26: Demanda catiónica servilleta 1T antes y después de la intervención.	38
Figura 27: Consumo específico promedio de agentes de resistencia Sabanilla.	42
Figura 28: Consumo promedio agentes de resistencia toalla 1.	44
Figura 29: Curva de saturación de Poliamidoamina-epiclorhidrina comercial (cuadrados), Poliacrilamida (círculos) y Poliacrilamida aniónica (triángulos) [37].	45
Figura 30: Consumo específico promedio agentes de resistencia.	46
Figura 31: Consumo específico promedio de agentes de resistencia Toalla 3.	47
Figura 32: Consumo específico almidón catiónico.	48
Figura 33: Correlación días fabricación servilletas o toallas y consumo de almidón.	50
Figura 34: Volumen de control considerado para balance de carga.	62
Figura 35: Planilla de cálculo consumos específicos de agentes de resistencia.	66
Figura 36: Planilla de control implementada.	67
Figura 37: Volumen de control considerado para el balance de carga.	69

1 Introducción

El papel Tissue es un tipo especial de papel de uso sanitario y doméstico que se caracteriza por su capacidad absorbente, elasticidad, suavidad y bajo gramaje. Los papeles Tissue incluyen al papel higiénico, servilletas, pañuelos, toallas y representan un importante insumo en la fabricación de pañales. Para la elaboración de este tipo de papel se utilizan fibras celulósicas vírgenes, recicladas o una mezcla de ambas. [1]

El proceso de producción de papel Tissue se divide en tres etapas. La primera, denominada *preparación pasta*, consiste en disgregar la materia prima y acondicionarla fisicoquímicamente previo a su ingreso a la máquina papelera. Para esto, la suspensión papelera debe ser depurada, dispersada a alta temperatura y fibrilada en los refinadores. En la segunda etapa del proceso, denominada *secado*, la pasta es ingresada a la máquina papelera, en donde por medio de un estruje mecánico y un secado a alta temperatura, la hoja de papel Tissue es formada. La etapa final, denominada *conversión rollo*, consiste en enrollar, cortar y otorgar el formato de venta al papel Tissue, dejándolo así, listo para su despacho al comercio. [2]

Durante todo el proceso de producción de papel Tissue, diversos aditivos químicos son adicionados a la suspensión papelera, con el objetivo de entregar estándares específicos a los productos, o bien, mantener las condiciones de operación estables. Entre estos aditivos destacan los abrillantadores ópticos, agentes de resistencia en seco y húmedo, floculantes y biocidas. Los productos químicos dosificados en la etapa de preparación pasta conforman lo que se denomina la química húmeda del papel. [3]

Entre las herramientas utilizadas para controlar la química húmeda del papel, destacan las mediciones de potencial zeta y de demanda iónica. La primera es una medida cuantitativa de la carga superficial de las fibras, se relaciona con la estabilidad que éstas poseen en suspensión y con la capacidad que tienen de adsorber aditivos de carga opuesta. La segunda herramienta de medición, la demanda iónica, cuantifica la concentración de contaminantes en la suspensión papelera, lo cual se relaciona directamente con el rendimiento de los agentes o aditivos de resistencia. Estos últimos son los encargados de otorgarle resistencia mecánica, tanto en seco como en húmedo, al papel. [3]

El presente estudio tiene como objetivo estudiar e intervenir, por medio de un seguimiento de demanda iónica y un control de gestión, el rendimiento de los agentes de resistencia en las líneas productivas de CMPC Tissue S.A.

CMPC Tissue S.A, es una de las más grandes productoras de papel Tissue a nivel latinoamericano y desde principios del 2016, la planta ubicada en la comuna de Puente Alto ha experimentado un creciente desvío de costos a causa del sobreconsumo de almidón, agente de resistencia en seco, y Cartabond, agente de resistencia en húmedo. [4]

Distintas plantas de papel Tissue a nivel mundial reportan que un control constante de demanda iónica, junto con otras medidas de control, permiten disminuir la concentración de contaminantes y optimizar el consumo de agentes de resistencia. Uno de estos estudios se desarrolla en la planta de papeles S.A. Colombia, en donde por medio de un control de demanda iónica y potencial zeta, se logra disminuir el consumo de almidón catiónico. Resultados similares son reportados en la planta productora Utzenstorf, Suiza. En ambos estudios el valor exacto de la disminución no es reportado debido al carácter confidencial de los datos. [5] [6]

Si bien las mediciones de demanda iónica han sido útiles para controlar la dosificación de agentes de resistencia, en la mayoría de los estudios bibliográficos, esta herramienta ha sido complementada con mediciones sistemáticas de potencial zeta. Conocer el potencial zeta de las fibras en suspensión, permite identificar problemas de dosificación que no pueden ser advertidos por mediciones de demanda iónica. CMPC Tissue, planta Puente Alto, no cuenta con un equipo capaz de cuantificar esta propiedad. [7]

El presente trabajo inicia con un levantamiento del estado actual de demanda iónica en las dos líneas productivas de CMPC Tissue, planta Puente Alto. Esta evaluación hace posible identificar, proponer e implementar mejoras en la dosificación de agentes de resistencia. Los papeles identificados sin problemas, son abordados con una estrategia de control y gestión. Por último, en la sección final, se cuantifica y proyecta el beneficio económico consecuencia de este proceso de optimización.

1.1 Objetivos generales

- Optimizar el uso y dosificación de agentes de resistencias en las máquinas papeleras N°16 y N°17 pertenecientes a la empresa CMPC Tissue, planta Puente Alto.

1.2 Objetivos específicos

- Obtener y analizar el perfil de demanda iónica en los principales papeles de cada máquina papeleras.
- Identificar problemas de sobredosificación de aditivos mediante un control de demanda iónica.
- Optimizar y proponer mejoras en el uso y dosificación de agentes de resistencia.
- Evaluar y proyectar económicamente el impacto de las propuestas sugeridas e implementadas.

2 Marco teórico

A continuación, se ahonda en los conocimientos técnicos que sustentan el trabajo realizado. La sección inicia con una breve reseña acerca de la empresa en la que se lleva a cabo el trabajo, seguida por una descripción de la materia utilizada, del proceso de producción y de los aditivos químicos que se utilizan en el proceso; la sección finaliza detallando qué es y cómo se cuantifica la demanda iónica.

2.1 Empresa

Empresas CMPC S.A. (Compañía Manufacturera de Papeles y Cartones) es un holding forestal y papelerero fundado en 1920 con sede central en Chile. Es una de las empresas líderes en la producción y comercialización de productos forestales, papeles y productos Tissue. CMPC S.A. holding controla las operaciones de sus cinco filiales: CMPC Forestal, CMPC Celulosa, CMPC Papeles, CMPC Productos de papel y en donde se enmarca este estudio, CMPC Tissue S.A. [1] [8]

CMPC Tissue S.A es la segunda mayor productora de papel Tissue a nivel latinoamericano y la octava a nivel mundial, se encarga de la producción de pañales, servilletas, toallas y papel higiénico. Las principales subsidiarias productoras y comercializadoras que componen este segmento son: CMPC Tissue S.A. (Chile), La Papelera del Plata S.A. (Argentina), Melhoramentos CMPC Ltda. (Brasil), Protisa S.A (Perú, Colombia y Ecuador), IPUSA (Uruguay), Absormex CMPC Tissue S.A. (México) y Drypers Andina S.A. (Colombia). Todas estas sucursales cuentan con líneas productivas de papel Tissue y conversión rollo, salvo Protisa S.A. Ecuador, la cual solo posee máquinas convertidoras. [9]

CMPC Tissue S.A. posee dos plantas en Chile. La primera se ubica en la comuna de Puente Alto y se dedica a la producción de las marcas Noble, Elite y Confort, además de producir pañales de la marca Babysec. La segunda planta se encuentra en Talagante y cuenta con, además de la misma producción de Puente Alto, líneas convertidoras de pañuelos y servilletas. [4]

La planta de CMPC Tissue Puente alto se ubica en la calle Eyzaguirre #01098. Tiene una extensión de 250.000 [m²] y entrega trabajo a más de 950 personas. Actualmente cuenta con 2 máquinas papeleras en operación que producen cerca de 4.800 toneladas de papel Tissue cada mes. [10]

2.2 Materia prima

La materia prima utilizada en la fabricación de papel Tissue puede ser papel recuperado o fibra celulósica virgen. La proporción y calidad de la materia prima utilizada por cada papel conforman lo que se denomina la receta del papel. Cada papel tiene su receta particular en función de la blancura que se desea obtener.

2.2.1 Celulosa (Fibra virgen)

La celulosa es un polisacárido obtenido a partir del tratamiento mecánico y químico sobre madera virgen, es utilizada en la fabricación de papeles de alta calidad debido a su alta blancura y baja concentración de impurezas. Los papeles fabricados a partir de celulosa virgen de alta calidad presentan altas resistencias mecánicas, alta blancura y alto grado de suavidad. La celulosa se puede separar en 2 grandes grupos según su método de producción: [11]

- **Pulpa Mecánica:** Es producida a partir de la desfibrilación de rollizos de madera, los cuales son presionados contra un cilindro giratorio abrasivo que va desprendiendo astillas y fibra. Es considerada como celulosa de baja calidad y se utiliza en la manufactura de cartones y revistas.
- **Pulpa Termoquímica (CTM):** El proceso involucra, como su nombre lo indica, la acción de etapas químicas y mecánicas. En la etapa química, las astillas son tratadas con una solución de sulfito de sodio; este componente permite aislar la celulosa del resto de los componentes. La pulpa CTM se suele utilizar en papeles de alta y media calidad.

2.2.2 Papelotes (fardo de papel reciclado)

Se denomina papelote al fardo de papel o cartón reciclado. Este tipo de materia prima se clasifica según la blancura que aporta a la suspensión y se utiliza en la fabricación de papeles de calidad media y baja. A continuación, se hace una breve mención a los tipos de papelotes que existen, cabe mencionar que fueron ordenados de mayor a menor calidad. En la Figura 1 se visualiza una grúa horquilla desplazando un papelote dentro del patio de materias primas. [12] [13]

- **Blanco #1:** Corresponde a papel o cartulina 100% celulósica sin impresión y sin agente de resistencia en húmedo.
- **Blanco #2:** Corresponde a papel o cartulina 100% celulósica con impresión media y un máximo del 2% de revistas, diarios e imprentas.
- **Blanco #3:** Corresponde a papel o cartulina 100% celulósico con impresión alta y un máximo del 10% de papeles con 50% o menos de pulpa mecánica.
- **Recorte manta blanco #1, #2 y #3:** Hace referencia a papel de manufactura propia que ha sido descartado por no cumplir con los estándares necesarios. Su clasificación se lleva a cabo según la blancura que posee.
- **Duplex:** Cartulinas compuestas por una cara de celulosa de alta calidad y otra de pulpa mecánica sin agentes de resistencia en húmedo.
- **Revista:** Papeles con alto nivel de revistas y/o carteles publicitarios, sin agente de resistencia en húmedo y con medio y alto nivel de impresión. Son altos en pulpa mecánica.

- **Corrugados:** Se compone de 95% de cartón corrugado o cartulina sin agentes de resistencia en húmedo y 5% de cartón corrugado o cartulina con agentes de resistencia en húmedo. Son altos en pulpa mecánica.



Figura 1: Grúa Horquilla desplazando un papelote dentro del patio de materias primas.

2.3 Proceso de producción de papel Tissue.

El proceso de producción de papel Tissue se divide en 3 etapas: “Preparación pasta”, “Secado en máquina papelera” y “Conversión rollo”. Para entender el contexto del estudio, se hace énfasis en la etapa de preparación pasta.

2.3.1 Preparación pasta

Es el conjunto de equipos e instalaciones que anteceden el ingreso de la pasta a la máquina papelera. Esta etapa tiene como objetivo disgregar la materia prima, remover la mayor cantidad de impurezas y otorgar una mayor área superficial a las fibras. La preparación pasta inicia con la disgregación de la celulosa y/o papel reciclado y finaliza cuando la pasta alcanza el estanque cabecera de máquina.

2.3.1.1 Disgregación

La disgregación consiste en degradar y suspender en agua la celulosa y/o papel reciclado con el fin de formar una pasta consistente capaz de ser bombeada a lo largo del proceso. Esta fase se lleva a cabo en grandes equipos denominados *Pulper*.

Un *Pulper* se compone de dos unidades: la primera es la carcasa o estanque, usualmente de acero inoxidable, encargada de contener el volumen a disgregar. La segunda unidad consta de un robusto rotor con aspas ubicado en la parte inferior del estanque, este es el causante de la disgregación de la materia prima. Es relevante mencionar que estos equipos pueden ser de operación continua o *batch*. Finalizada la disgregación, es importante conseguir una buena individualización de las fibras habiendo utilizado la menor cantidad de energía posible. En la Figura 2 se observa el corte transversal de un *Pulper* de uso industrial.



Figura 2: Pulper de uso industrial utilizado en la fabricación de papel.

2.3.1.2 Depuración

Es el proceso donde se retiran todas las impurezas de la pasta, trozos de plásticos, metales, astillas, resinas, contaminantes orgánicos e inorgánicos, entre muchos otros. Existe una gran variedad de equipos de separación que pueden ser utilizados para depurar. A continuación, se describen los utilizados por CMPC Tissue, planta Puente Alto.

2.3.1.2.1 Depuradores ciclónicos

La Figura 3 muestra el diagrama de funcionamiento de un depurador ciclónico. La alimentación se realiza de forma tangencial al cuerpo del equipo, con el objetivo de formar un torbellino primario a lo largo de la superficie interior de la pared de las partes cilíndrica y cónica. Dada esta configuración, existe un flujo que evacua el equipo por la salida inferior, *underflow*, y que transporta partículas indeseadas, como metales y material inorgánico. Por otra parte, la mayoría del líquido que ha sido limpiado por la sedimentación es forzado a abandonar el equipo a través de la tobera de flujo superior, formando un torbellino secundario ascendente alrededor del núcleo de la carcasa. El flujo que abandona el equipo por la parte superior se denomina *overflow* y lleva consigo la mayor parte de la fibra útil. [14]

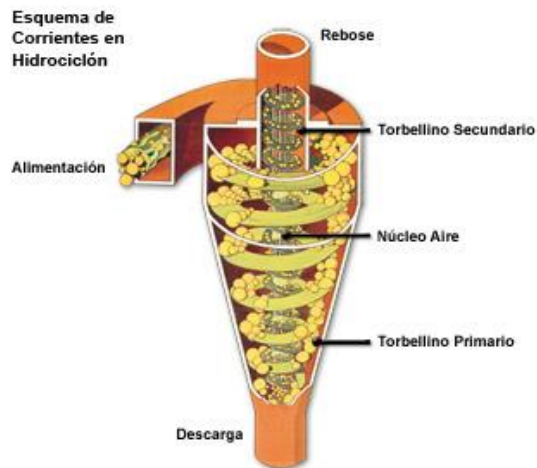


Figura 3: Funcionamiento de un depurador ciclónico.

2.3.1.2.2 Coladores mecánicos

Los coladores mecánicos consisten en un tambor giratorio que, por medio de la acción de fuerza centrífuga, empuja la pasta contra un tamiz estático, dejando pasar solo el tamaño de partícula requerido. El tamaño del tamiz se ajusta al tipo de depuración deseada. En la depuración primaria se suele utilizar coladores perforados con un tamaño de agujero de 1,6 [mm]; por otro lado, en la secundaria se ocupan tamices ranurados de 0,2 [mm]. El uso de este equipo permite remover, entre muchos otros desechos sólidos, los *macrostickies*. Este tipo de basura provoca grandes problemas en la industria papelera. [11]

2.3.1.2.3 Despastillador

Es un equipo de discos, uno estacionario y otro giratorio, que mediante esfuerzo mecánico permite deshacer paquetes de fibras en el papel reciclado y disgregar astillas no cocidas en la fibra virgen. Su rendimiento se puede modificar regulando la separación de los discos. Se suele utilizar tanto para papel reciclado como para celulosa. [11]

2.3.1.3 Dispersión

Es el proceso en el cual, a través de energía mecánica y alta temperatura, se dispersan las impurezas que no se lograron remover en los equipos de depuración. Se hace énfasis en que no consiste en una fase de depuración, ya que las impurezas siguen presentes en la pasta, sin embargo, dado su reducido tamaño, dejan de ser visibles.

El proceso se lleva a cabo en un dispersor, equipo que posee 2 discos, un estator y rotor, separados por un pequeño *gap* y con una dentadura complementaria. La pasta previamente calentada por inyección de vapor se ve obligada a pasar por el reducido espacio entre los discos, aplastando y dispersando pequeñas impurezas. En la Figura 4 se observa un dispersor utilizado en la industria papelera. [15]



Figura 4: Dispensor utilizado en la fabricación de papel.

2.3.1.4 Refinación

Corresponde al proceso de fibrilación de la capa externa de fibras celulósicas a causa de la aplicación de energía mecánica. En esta etapa se altera el área superficial de las fibras, mejorando así, la propiedad fisicoquímica más relevante en la elaboración de papel.

El refinador consta de dos discos, uno estacionario y otro giratorio, entre los cuales se hace pasar la fibra suspendida en agua. El movimiento del disco giratorio sobre el estático rasga y aplasta la fibra, lo que provoca un desprendimiento parcial de la capa externa de ésta (fibrilación). Este proceso hace aumentar el área superficial de contacto y deja expuesto los grupos hidroxilos y carboxilos presente en la celulosa. Estos grupos funcionales son responsables de la unión entre fibras.

La refinación es considerada como la etapa más importante en el proceso de preparación pasta. Antes del paso por el refinador, la fibra tiene una superficie lisa con poca área superficial, lo que se traduce en una resistencia baja del papel. Luego del paso por el refinador, la fibra sufre una especie de despeluce, aumentando el área de contacto entre las fibras y logrando así una mejor resistencia. En la Figura 5 se observa el cambio a nivel microscópico que se produce en el proceso de refinación. En la imagen de la derecha se observa una mayor densidad de unión de fibra que en la izquierda. [16]

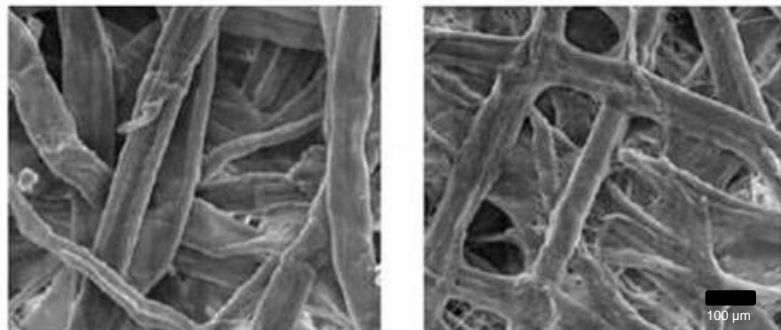


Figura 5: Fibra sin refinar (izquierda) fibra refinada (derecha).

2.3.1.5 Estanque cabecera de máquina

Es la fase final de la preparación pasta donde se agregan los aditivos que entregan los valores específicos de resistencia y blancura de cada producto. Las dosis dependerán del tipo de papel que se esté fabricando; se suelen añadir agentes de resistencia en seco y húmedo, abrillantadores ópticos y matizantes ópticos. Es importante que este estanque posea una buena agitación y un tiempo de residencia suficiente para que los aditivos hagan efecto.

2.3.1.6 Circuito de aproximación

En la literatura, este circuito se describe como una pequeña etapa independiente, tanto del proceso de preparación pasta como del secado en máquina papelera. Para efecto de este trabajo, se considera como una fase extra de la preparación pasta.

El circuito de aproximación se compone de varias etapas de depuradores ciclónicos donde el aceptado de la primera etapa es recibido por la bomba de dilución *Fan Pum*. Por otro lado, el rechazo es enviado a una segunda etapa depuradora donde el aceptado es regresado a la primera etapa. El circuito lo completa un colador vertical, último equipo de separación utilizado en el proceso. En la Figura 6 es posible ver una representación esquemática de este circuito.

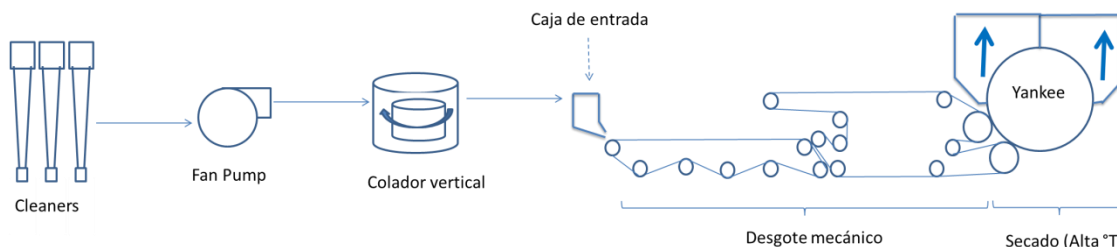


Figura 6: Diagrama circuito de aproximación.

2.3.2 Formación y secado en maquina papelera

Es el proceso en el cual se remueve la mayor parte del agua presente en la pasta, dando paso a la formación de la hoja de papel Tissue. Todo esto se lleva a cabo en la máquina papelera y consta de dos etapas claramente diferenciables. En la primera, la remoción de agua es por medio de métodos mecánicos, como lo son la acción de las telas, prensas, bombas de vacío, entre otros. La segunda etapa consta de un secado a alta temperatura en un gran cilindro giratorio a alta temperatura denominado *Yankee*.

CMPC Tissue, planta Puente Alto, posee 2 máquinas papeleras. La primera es una máquina modelo *Duo Former*, donde la formación ocurre entre dos telas que aprisionan el chorro originado por la caja de entrada, formando la hoja, dirigiéndola hacia el paño y posteriormente hasta el cilindro *Yankee*. La segunda máquina, corresponde a un modelo de mesa plana conocido como *Fourdrinier*, donde el chorro de formación golpea una tela que obliga a la hoja a seguir un recorrido horizontal en dirección al paño y

cilindro *Yankee*. Cuando la hoja de papel abandona el cilindro *Yankee*, en ambos casos, es enrollada en grandes cilindros de papel que reciben el nombre de *Jumbos*. A continuación, en la Figura 7 y Figura 8 se muestra una representación esquemática de ambas máquinas papeleras, remarcando en color rojo el recorrido de la hoja. [11]

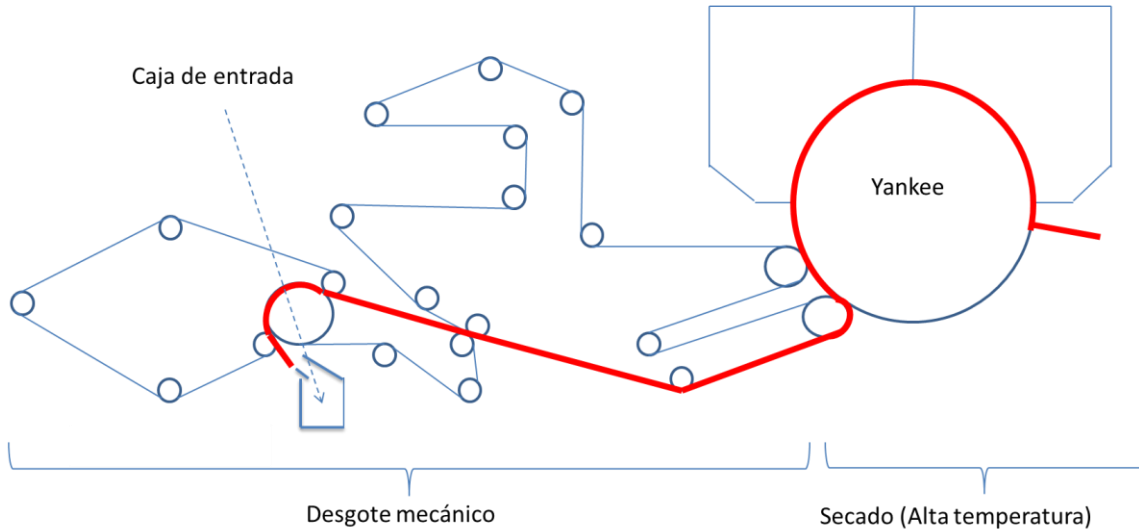


Figura 7: Circuito de pasta máquina papelera *Duo Former*.

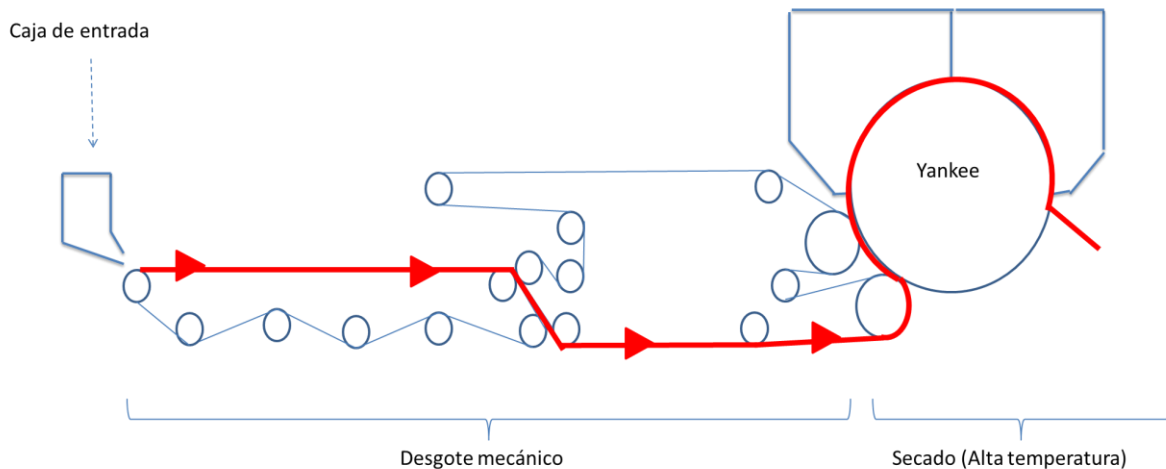


Figura 8: Circuito de pasta máquina papelera *Fourdrinier*.

2.3.3 Conversión rollo

La conversión rollo es la etapa en la cual a partir de un *Jumbo* se obtiene un producto listo para la venta comercial. El proceso se inicia desenrollando el papel Tissue y re envolviéndolo en un cilindro de cartón conocido como tubete. Esta nueva conformación es cortada, otorgando al papel Tissue el formato venta. Al final de esta etapa el

producto ya está listo para ser despachado al comercio. En la Figura 9 es posible apreciar una línea convertidora de toallas.



Figura 9: Líneas convertidoras de papel Tissue.

2.4 Suspensión papelera

En la presente sección se detallan los componentes presentes en una suspensión papelera o pasta. La proporción de cada uno de estos va a depender de la calidad del papel manufacturado.

2.4.1 Fibras

Se componen principalmente de celulosa, la cual constituye cerca del 50% de la materia orgánica de la biosfera. Es un polímero lineal formado a partir de D-glucopiranosas, la cual es una estructura cíclica formada por seis átomos de carbono. La celulosa se apila a partir de la interacción de puentes de hidrógeno intra e intermoleculares formando disposiciones ordenadas con alta resistencia mecánica. [17]

Las fibras de celulosa poseen una carga superficial negativa que se estima entre los 2 y 100 [$meq/100g$]; esta característica le entrega la capacidad de adsorber productos de carácter catiónico y es un importante parámetro a controlar en la caja de entrada de la máquina papelera. [18]

2.4.2 Finos

Son desprendimientos de fibra del orden de decenas de micrómetros. Su presencia aumenta considerablemente después del proceso de refinación. Poseen una alta área específica y una gran capacidad para absorber agua. Muchas veces esta gran hidrofilia limita la velocidad a la cual es secado el papel Tissue. [18]

2.4.3 Agua

Es esencial para la fabricación de papel. Representa el medio de dilución y transporte de pasta durante la mayor parte del proceso. Al ingresar a la máquina papelera, la suspensión papelera se compone de aproximadamente un 99,7% de agua.

2.4.4 Basura aniónica o coloidal

Consisten en sustancias interferentes de materiales disueltos y coloidales que tienen un efecto negativo en la fabricación de papel. Entre estos compuestos se encuentran las hemicelulosas, los restos de tintas, resinas derivadas del proceso de producción de celulosa (*Picth*), ácidos grasos, restos de aditivos de blanqueo, adhesivos, bactericidas, entre otros.

Estas impurezas aumentan la demanda coloidal negativa o demanda aniónica de una suspensión papelera, suelen reaccionar con aditivos de carga opuesta formando complejos inactivos y perjudiciales. Un tipo de basura aniónica de particular interés es el denominado *stickies*, este tipo de impureza posee una alta pegajosidad, causando problemas de incrustación en circuitos y rechazos en las máquinas convertidoras. El *stickies* suele confundirse con el *pitch*, que corresponde a restos lignocelulósicos no tratados en la celulosa virgen, con propiedades fisicoquímicas idénticas a los *stickies*. [3] [19]

Los *stickies* se pueden dividir en *microstickies* y *macrostickies*. Los primeros no superan los 200 [μm] y tampoco representan grandes problemas durante el proceso de producción, no obstante, al aglomerarse conformar los denominados *macrostickies*.

2.5 Aditivos Químicos

Existen 2 tipos de aditivos químicos utilizados en la manufactura de papel, los aditivos de proceso y los aditivos químicos funcionales.

2.5.1 Aditivos de proceso

Son sustancias que facilitan la operación a lo largo del proceso. Se adicionan con el objetivo de evitar y/o compensar las perturbaciones operacionales que pudiesen presentarse, lo que mejora la producción, la eficiencia y disminuye el número de reventaduras de hoja y paradas de máquina. En esta categoría se encuentran los químicos para el tratamiento de telas y paño, agentes de control de *pitch* y *stickies*, biosidas, agentes de retención, agentes de drenaje y antiespumantes. [3]

Un tipo especial de aditivo de proceso utilizado por CMPC Tissue, que será relevante en las próximas secciones, corresponde a una arcilla de silicio activado capaz de adsorber *stickies* en su superficie.

2.5.2 Aditivos químicos funcionales

Son sustancias químicas que entregan propiedades específicas cuantificables en la suspensión papelera o al papel mismo, las más relevantes son: blancura, humedad, amarillez, brillantez y la más importante en este trabajo, resistencia mecánica. Los agentes de resistencia utilizados por CMPC Tissue, planta Puente Alto, corresponden a almidón catiónico y Cartabond, este último es conocido como RH. [3]

2.5.2.1 Almidón catiónico

Químicamente es similar a la celulosa, ya que consiste en la unión de glucopiranosas a través de los carbonos 1 y 4. En su forma natural no tiene afinidad por la celulosa, ya que al igual que ésta presenta características aniónicas. Sin embargo, por medio de un proceso de esterificación se le adicionan grupos funcionales catiónicos aminas. Este carácter catiónico le entrega al almidón la capacidad de actuar como floculante en la suspensión papelera, uniendo las fibras de celulosa y mejorando la resistencia transversal y longitudinal del papel manufacturado. El nivel de cationicidad de la celulosa está dado por el grado de sustitución de grupos carboxilos por grupos aminos. [20]

CMPC Tissue, planta Puente Alto, bombea a los estanques cabeceras de máquina una solución de almidón, preparada en la planta, que oscila entre los 3 y 4 grados *Brix*. Esto quiere decir que en una solución de 100 [ml] se hallan entre 3 y 4 [g] de almidón puro. Es importante destacar que el almidón está presente en todos los papeles manufacturados en la planta, es decir, en higiénicos, servilletas y toallas.

2.5.2.2 Cartabond (RH)

Corresponde a una resina de poliamidoamina–epiclorhidrina libre de formaldehído. Esta resina es capaz de impedir que el agua penetre en los puentes de hidrogeno de las fibras y a su vez genera uniones covalentes con la capacidad de resistir la acción del agua. La adición de agente de resistencia en húmedo debe ser acompañado de un proceso de curado a alta temperatura, esto permite que la resina polimerice y genere una red tridimensional resistente al agua. La adición de Cartabond, además de otorgar resistencia en húmedo, refuerza la resistencia transversal y longitudinal en seco del papel. CMPC Tissue, planta Puente Alto, compra y bombea este producto a una concentración de 20% en polímero activo a los estanques de cabecera de máquina durante la fabricación de servilletas y toallas. [21]

El uso de ambos agentes de resistencia se cuantifica en kilogramos de producto adicionado por tonelada de papel producida. Este parámetro recibe el nombre de consumo específico. En el Anexo A: Memoria de cálculo consumo específico de aditivos” se ejemplifica y detalla el procedimiento para cuantificar consumo específico de ambos agentes de resistencia.

El departamento de desarrollo, fija un consumo específico estándar de 7 kg de almidón por tonelada de papel para higiénicos, toallas y servilletas. Además, de 30 kg de Cartabond por tonelada producida de toallas y servilletas.

2.6 Demanda iónica

Es la capacidad que posee una suspensión papelera de adsorber especies químicas con carga eléctrica, en otras palabras, es una medida de electronegatividad de los sólidos disueltos en la suspensión. [22]

Se pueden realizar dos medidas de demanda: la demanda catiónica y la demanda aniónica. Ambas se cuantifican según la cantidad de polímero, negativo o positivo, que se requiere para llevar una suspensión o muestra sólida a su punto isoeléctrico. Este método de caracterización recibe el nombre de titulación polielectrolítica y se suele expresar en equivalentes por litro [eq/l] para una solución acuosa y en equivalentes por gramo [eq/g] para fibras y finos. Los polímeros más utilizados para llevar a cabo este tipo de titulación son el Polydamac, como aditivo catiónico, y el Pes-Na, como aditivo aniónico. [18]

2.6.1 Demanda iónica fibras de celulosa

Las suspensiones papeleras poseen en su mayoría fibras de celulosa. La celulosa es un polímero natural presente en la mayor parte de la biomasa terrestre. Posee grupos carboxílicos e hidroxilos que ionizados, le otorgan una carga superficial negativa a la fibra. La carga superficial se verá afectada por el pH de la solución; a mayor pH, menor será la carga. Es importante filtrar la suspensión papeleras de modo de remover fibras y finos, ya que causan ruido en la toma de datos y el equipo presente en la empresa no cuenta con la capacidad de medir directamente demanda iónica de sólidos de ese tamaño. En el presente estudio solo se llevan a cabo mediciones de demanda iónica de suspensiones papeleras libres de finos y fibras. [23]

2.6.2 Demanda iónica sistema coloidal de una suspensión papeleras

La demanda iónica del sistema coloidal va a estar dada por la concentración de basura iónica que se encuentre presente en la suspensión papeleras filtrada. Si el sistema tiene basura coloidal aniónica, la demanda reportada será catiónica, de igual forma, si el sistema tiene basura catiónica, la demanda será aniónica. En el proceso de manufactura de papel la basura coloidal siempre debe ser de carácter aniónica.

La basura aniónica en el proceso de producción de papel se compone de restos de aditivos de blanqueo, trazas de agentes de resistencia, restos de antiespumantes, resinas, adhesivos y residuos no removidos durante la producción de celulosa. En general, entre menor sea la calidad del papel reciclado, mayor será la cantidad de basura aniónica presente en el sistema.

Como ya se ha mencionado, se asume que estas sustancias interferentes se encuentran en estado coloidal y, por lo tanto, cumplen con la teoría de la doble capa difusa. Esta teoría establece que la carga superficial de los coloides, en este caso negativos, provoca un reordenamiento de su entorno, de modo que los iones de signo opuesto, denominados contra-iones, son atraídos hacia la superficie del coloide, lo que forma una distribución de carga alrededor de la partícula. Esta conformación recibe el nombre de doble capa eléctrica. En la Figura 10 se muestra la distribución mencionada. [24]

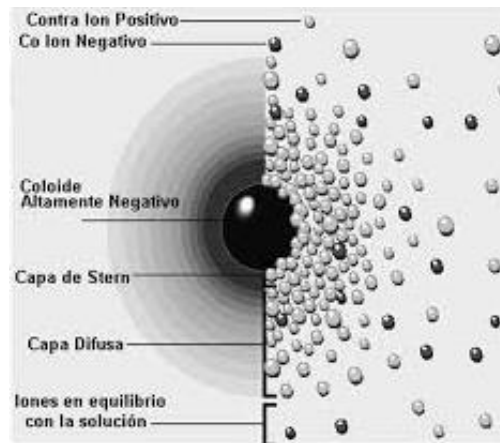


Figura 10: Reordenamiento iónica alrededor de un coloide.

La primera capa sobre el coloide recibe el nombre de capa de rígida o de *Stern*. Esta capa es relativamente delgada y los iones presentes se encuentran en posiciones fijas y muy próximas a la superficie del coloide. La segunda capa, denominada difusa, tiene una distribución más extendida y presenta un movimiento más acusado de iones. Es relevante entender esta teoría, ya que el método de medición de demanda iónica utiliza este fenómeno como base para explicar la teoría de medición.

2.6.3 Medición de la demanda iónica del sistema coloidal

Para cuantificar la demanda iónica se utiliza una solución polimérica de concentración y densidad de carga conocida. La medición consiste en adicionar pequeñas cantidades de esta solución y cuantificar el potencial de flujo (movimiento de cargas) cada vez que se agrega una cantidad conocida de solución polimérica de carga opuesta. Cuando el potencial llega a cero se puede decir que la solución se encuentra en el punto isoeléctrico y, a partir del volumen necesario para llevar el sistema a este punto, se puede obtener la demanda del sistema. El balance de cargas se observa en la ecuación 1, donde N representa la normalidad y V el volumen de la muestra o del titulante. [5]

$$N_{muestra} \left[\frac{\mu eq}{l} \right] = \frac{V_{titulante} [l] \cdot N_{titulante} \left[\frac{\mu eq}{l} \right]}{V_{muestra} [l]} \quad (1)$$

La medición de potencial se lleva cabo con el método *Streaming current detector* que consiste en un vaso de teflón cilíndrico dentro del cual se desplaza un pistón de movimiento vertical oscilante a frecuencia constante. La solución del vaso está comunicada con el volumen interior del pistón, por lo que cada vez que el pistón se mueva, también lo hace la solución. En Figura 11 se muestra el funcionamiento del Mutek PCD03.

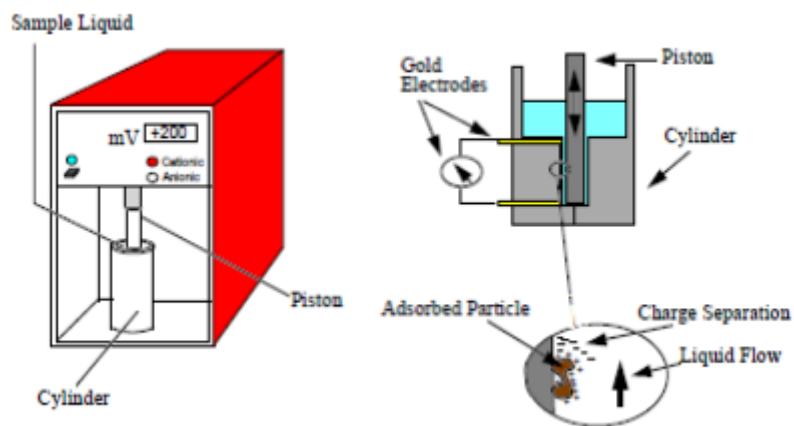


Figura 11: Funcionamiento del Mutek PCD03.

Esta técnica de medición asume que los coloides son adsorbidos sobre la superficie del pistón de teflón, dejando libre los contra-iones en solución, por lo tanto, cada vez que se mueve el pistón, también lo hacen los iones, lo que genera una diferencia de potencial cuantificable. Al adicionar el titulante, los iones se neutralizan y disminuye el potencial reportado. Anexo B: Ejemplo de medición y cálculo de demanda catiónica”, se presenta los datos de una medición real.

2.5.4 Propiedades mecánicas del papel

Las propiedades mecánicas del papel están relacionadas con los ensayos destructivos que miden la capacidad del papel a resistir la tracción. Estos ensayos están normalizados y permiten someter el papel a controles de calidad fiables y reproducibles. La resistencia mecánica puede ser modificada cambiando la composición fibrosa, las propiedades fisicoquímicas de la fibra o adicionando aditivos especializados.

La composición de la fibra es función de la calidad de la materia prima utilizada en el proceso de fabricación, papeles con mayor porcentaje de fibra celulósica virgen tienen mejor resistencia intrínseca que papeles fabricados a partir de papel reciclado. Esto se basa en que la fibra virgen tiene mejor resistencia intrínseca y mayor largo promedio que la fibra reciclada.

Durante la etapa de refinación se produce una desfibrilación de la capa externa de la fibra, lo que deja al descubierto una mayor cantidad de grupos funcionales capaces de interactuar entre sí y establecer puntos de unión. Sin embargo, existe un punto límite de refinación, una pasta muy refinada logrará una mayor resistencia, pero a la vez generará una mayor cantidad de finos, limitando el proceso de secado y aumentando la pérdida de fibra.

En general, la refinación y la resistencia intrínseca de la fibra no bastan para alcanzar las propiedades mecánicas requeridas por el papel, por lo cual se suele añadir aditivos especializados que aumentan la resistencia en seco por medio de un incremento en los

puentes de hidrógeno intra e intermolecularmente entre las fibras. En CMPC Tissue, planta Puente Alto, el aditivo de resistencia en seco utilizado corresponde al almidón catiónico. [4]

Para el caso de la resistencia en húmedo el análisis es similar, salvo que al humedecer el papel, los puentes de hidrogeno se debilitan, haciendo al papel perder más del 95% de su resistencia. Para esto se adicionan aditivos especiales que interactúan con la fibra de forma química, generando enlaces covalentes capaces de mantener su propiedad cohesiva aún en presencia de agua. En resumen, aun cuando el tamaño de fibra y el grado de refinación no aumenten por sí mismos la resistencia en húmedo, sí lo hacen cuando se adicionan agentes especializados. [21]

Cada papel que se fabrica en la planta tiene rangos establecidos de niveles mínimos, estándar y/o máximos de resistencia longitudinal, transversal y en húmedo. Para controlar esto, CMPC Tissue, planta Puente Alto, cuenta con al menos 3 controles de calidad durante cada turno, en los cuales se llevan a cabo más de 25 mediciones de propiedades mecánicas procurando que el papel se encuentre en rangos adecuados de producción. [4]

3 Proceso productivo y requerimientos de la empresa

Considerando que el presente trabajo se enmarca en un contexto real de la industria nacional, se hace necesario ahondar en el proceso específico de producción de CMPC Tissue, planta Puente Alto, y en los antecedentes que llevaron a la empresa a solicitar este estudio.

3.1 Diagrama proceso productivo CMPC Tissue, planta Puente Alto

A continuación, con el fin de establecer un lenguaje común, se lleva a cabo una reseña de las líneas productivas de CMPC Tissue, destacando las principales etapas y el nombre de cada uno de los puntos relevantes en la toma y análisis de datos.

3.1.1 Línea de producción máquina papelera N°1

En la Figura 12 se presenta el diagrama productivo de la máquina papelera N°1.

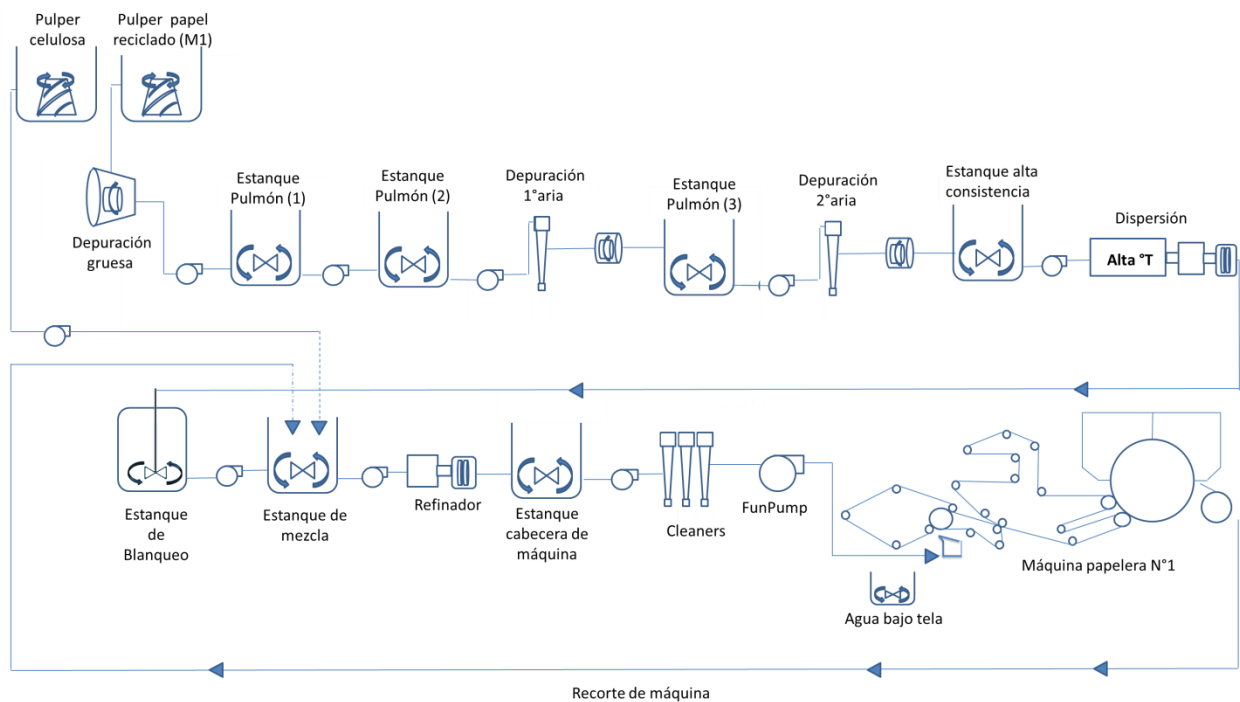


Figura 12: Diagrama de flujos línea máquina papelera N°1.

Esta línea cuenta con 2 *Pulper* de operación *batch*. El primero de estos alimenta ambas líneas papeleras y solo se utiliza para disgregar celulosa virgen. El segundo *Pulper* se encarga de disgregar el papel reciclado y en ocasiones también alimenta la línea productiva de la máquina N°2.

El papel reciclado debe atravesar tres fases de depuración y una de dispersión antes de llegar al estanque de mezcla. El último flujo que converge al estanque de mezcla corresponde a recorte propio, este tipo de pulpa se compone de todo papel que por diferentes razones fue descartado y vuelto a disgregar en un estanque situado justo debajo de la máquina papelera. La proporción de cada uno de estos flujos se mantiene

rangos acotados y recibe el nombre de música. El estanque posterior, cabecera de máquina es el punto de adición de los agentes de resistencia.

En el *Pulper* de papel reciclado, estanque pulmón 1 y estanque pulmón 3 se adicionan un silicato activado de alta área superficial (aditivo captador de coloides aniónicos). Este aditivo y las fases depurativas están encargados de disminuir los niveles de demanda iónica en el circuito, con el fin de evitar la aparición de *stickies* u otros depósitos adherentes.

3.1.2 Línea de producción máquina papelera N°2

Ambas líneas productivas son muy similares, tanto en equipos como en funcionamiento. A continuación en la Figura 13 se presenta el diagrama productivo de la máquina papelera N°2.

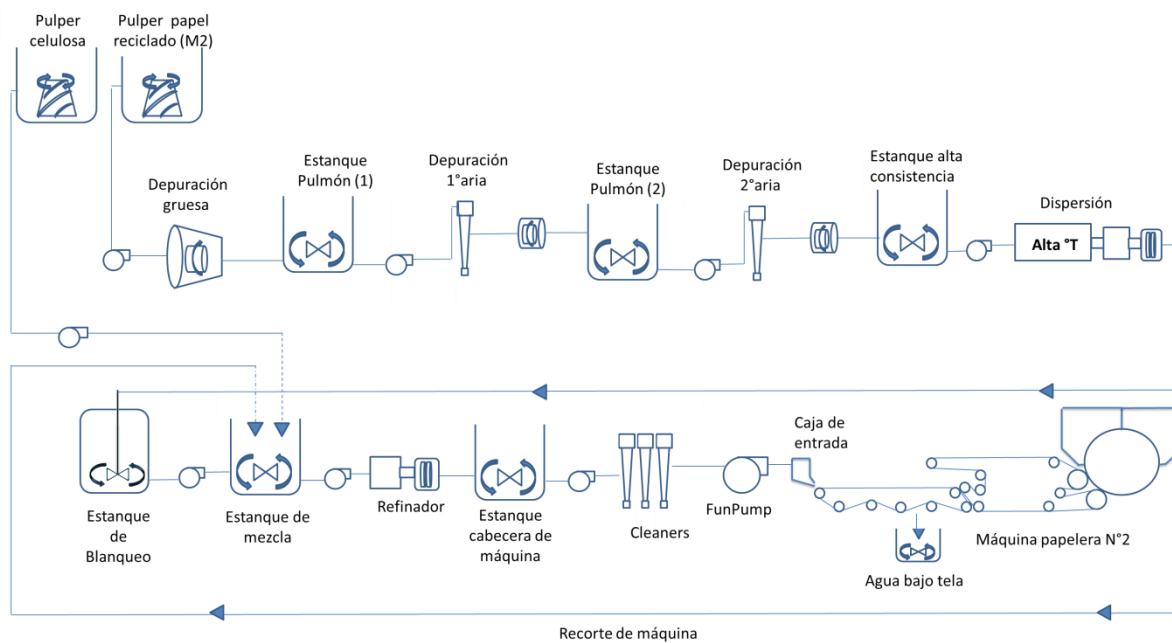


Figura 13: Diagrama de flujos línea máquina papelera N°2.

Esta línea productiva es alimentada con 2 *Pulper*; el de celulosa, que es el mismo utilizado en la máquina N°1 y el de papelotes, que en este caso es continuo y de consistencia baja. No es poco común que esta línea productiva sea alimentada por flujo de pasta proveniente del *Pulper* de papelote de la de la máquina N°1.

En el estanque de mezcla convergen los mismos tres flujos de la máquina N°1, papel reciclado, celulosa y recorte propio; y de igual forma, el silicato activado es adicionado tanto en el *Pulper* de papel reciclado como en los estanques pulmón 1 y 2.

3.2 Requerimientos de la empresa.

La papelería, al igual que el resto de las industrias productivas a nivel nacional, apunta a una disminución de costos productivos. CMPC Tissue S.A continuamente está buscando y evaluando oportunidades de mejora con el objetivo de producir al menor costo posible. La solicitud de este estudio y la adquisición del Mutek PCD03, se enmarcan en esta línea de ahorro.

CMPC Tissue, planta Puente Alto, ha reportado sobredosificaciones en ambas líneas productivas que han alcanzado el 40% en Cartabond y el 50% en almidón. Estos consumos se traducen en pérdidas económicas que superan los US\$5.000 al mes. [25]
[26]

4 Estudio niveles de demanda iónica en ambas líneas productivas

A continuación, se detalla el estudio de demanda iónica efectuado en las líneas productivas de las máquinas papeleras N°1 y N°2 pertenecientes a CMPC Tissue, planta Puente Alto.

4.1 Objetivo

El objetivo de este estudio es identificar posibles problemas y/o mejoras en la operación y dosificación de agentes de resistencia, a través de un estudio de demanda iónica.

4.2 Metodología

Se procede a cuantificar la demanda iónica, a lo largo de todo el proceso de producción, de los principales papeles de cada máquina papelera. Los resultados de cada papel son contrastados con variables de proceso, estudios similares e información de proveedores expertos.

4.3 Materiales

Durante la toma de muestras fue necesario contar con; seis vasos precipitados de 0,5 [L], tres probetas de polipropileno de 1[L], dos jeringas 1 [ml] y mallas de nylon de 200 [μm]. Estos implementos fueron provistos por Borotecsa S.A y Reicotex S.A. [27] [28]

La toma de datos se realizó con un detector de carga de partículas modelo Mutek PCD03. La titulación fue conducida utilizando Polydadmac como aditivo catiónico y Pes-Na como aditivo aniónico, ambos polímeros fueron utilizados a una concentración de 0,001 [N]. Tanto el detector de carga como los aditivos fueron suministrados por BTG instruments. [29]

4.4 Muestreo y medición

El primer paso consiste en remover 100 [ml] de suspensión papelerera en cada punto de interés. Para esto se utilizan vasos precipitados de 1 [L] y gafas de seguridad. Después de esto, se procede a aislar el sistema acuoso de fibras y finos, a través del paso de la pasta por una malla tamiz de 200[μm]. Es importante no ejercer presión durante la filtración de manera de evitar la contaminación con finos y/o fibras.

Una vez obtenido el filtrado, se remueven 10 [ml] de éste y se añaden al vaso de medición del Mutek PCD03. Luego, el equipo se debe encender y se deben esperar 60 [s] para que el potencial medido se estabilice. Con el potencial ya estabilizado, se comienza a adicionar el aditivo catiónico o aniónico según sea el caso. Para asegurar que el equipo entregue un valor estable, se deben esperar 30 [s] entre la adición de cada gota de titulante.

La medición finaliza cuando el sistema alcanza el punto isoeléctrico, es decir, cuando todos los coloides han sido neutralizados y el equipo entrega un valor de potencial de 0 ± 1 [mV]. Para lograr medidas reproducibles y estables, el vaso contenedor y el pistón

móvil deben ser limpiados cuidadosamente con agua destilada entre cada medición. [30] [31]

4.5 Resultados esperados

A continuación, en la Figura 14 se presenta el perfil de demanda iónica esperado según bibliografía para el circuito de la máquina papelera N°1. El caso de la máquina papelera N°2 es análogo, salvo que cuenta con un estanque pulmón menos. Notar que en suspensiones papeleras es común usar indistintamente el concepto de demanda iónica y catiónica, debido a que una operación normal siempre involucra la presencia de coloides aniónicos.

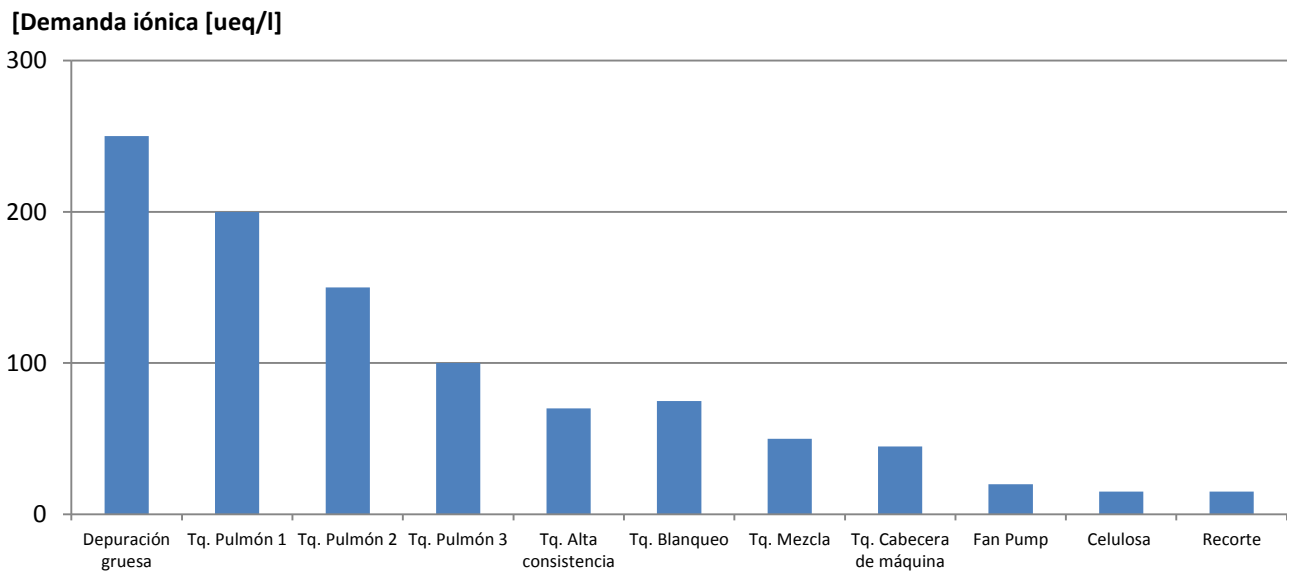


Figura 14: Perfil demanda catiónica línea máquina papelera N°1.

Como se observa en la Figura 14, la demanda iónica siempre debe ser de carácter catiónico. El valor más alto a lo largo del proceso se debe reportar a la salida de la depuración gruesa o en el *Pulper* mismo, esto se debe a que la materia prima acaba de ser disgregada, por lo que todas las impurezas propias del papel reciclado se encuentran suspendidas en la pasta.

El valor de la demanda catiónica en el *Pulper* y depuración gruesa debería oscilar entre los 90 y 300 [$\mu\text{eq}/\text{l}$], este valor depende del tipo de receta que se introduce al *Pulper*. Es de esperar que papelotes de calidad baja, como los corrugados, mixtos y dúplex; tengan demandas catiónicas superiores a los papelotes de calidad alta, como pueden ser los blancos #1, blancos #2, blancos #3 y sus respectivos recortes. [32] [33]

Desde el estanque pulmón 1 hasta el estanque de alta consistencia, la demanda catiónica debiese presentar una tendencia descendente. Este comportamiento se basa en 2 hechos; el primero, es que los estanques pulmón 1, 3 y alta consistencia están

antecedidos por etapas depurativas, y el segundo, es que en los estanques pulmón 1, 2 y 3 se adiciona un silicato activado removedor de basura aniónica.

Según bibliografía, los valores en el estanque de alta consistencia y estanque de blanqueo deben oscilar entre 10 y 200 [$\mu\text{eq}/\text{l}$], siendo el rango 30 y 90 [$\mu\text{eq}/\text{l}$] considerado estable y adecuado para papel Tissue. Es normal reportar un alza en la demanda catiónica del estanque de blanqueo, respecto a su antecesor, debido a restos remanentes de aditivos químicos blanqueadores. [31] [33] [34]

Un adecuado set de etapas depurativa y una precisa dosificación de removedores de basura aniónica, deben ser capaces de estabilizar, en valores bajos, el nivel de basura aniónica en el estanque de blanqueo y en el de alta consistencia. Papeleras a nivel mundial utilizan medidas *on line* de demanda catiónica, con el propósito de detectar variaciones en la calidad de la materia prima o problemas en las fases depurativas. Este control les permite operar de forma preventiva o *feedforward* en el proceso. [6] [35]

La demanda catiónica en el estanque de mezcla corresponde a la combinación lineal de la demanda de los estanques de blanqueo, celulosa y recorte. Estos dos últimos, deben poseer demandas catiónicas bajas (entre los 0 y 15 [$\mu\text{eq}/\text{l}$]). Esta exigencia de basa en la naturaleza virgen de la celulosa y en la reciente depuración mecánica y química del papel enviado a recorte. [34]

Al adicionar los agentes de resistencia en el estanque cabecera de máquina, se espera que estos sean adsorbidos en su totalidad por la fibra, por consiguiente, no debiese existir diferencia entre la demanda catiónica del estanque cabecera de máquina y el estanque de mezcla. Sin embargo, debido a la gran área superficial que posee la basura aniónica, es imposible garantizar que ésta no reaccione con el almidón y/o el Cartabond. Los esfuerzos en la planta se concentran en mantener la demanda del estanque de mezcla en niveles bajos (10 – 50 [$\mu\text{eq}/\text{l}$]) y así asegurar que la mayor cantidad de agentes de resistencia sean absorbido por la fibra y no por la basura aniónica. [31] [34]

Por último, un punto de particular interés es la bomba *Fan Pump*. Está reportado que entre menor sea la demanda en este punto, mejor retención tendrá la suspensión papelerera y existirá menor probabilidad de formación de depósitos adherentes en telas y paños. Sin embargo, si la demanda iónica se invierte, es muy probable tener problemas de formación de hoja en el cilindro *Yankee*, causados por la poca afinidad que tendría la pasta con los aditivos catiónicos que ahí se adicionan. En general, se suele llegar a la máquina papelerera con demandas superiores a los 5 – 8 [$\mu\text{eq}/\text{l}$]. De todas formas, este valor depende del contexto operacional de cada máquina papelerera. [36]

4.6 Resultados y discusiones

A continuación, se presentan los resultados y discusiones del estudio de demanda iónica efectuado en ambas líneas productivas.

4.6.1 Demanda iónica línea de producción máquina papelera N°1

La máquina papelera N°1 suele trabajar con papeles de calidad media. La mayor parte de su producción corresponde a higiénicos, en particular al higiénico 1. Todos los papeles analizados en la máquina N°1 se componen de un 30% de papel reciclado y un 70% de celulosa, siendo esta última, en ocasiones, reemplazada por recorte propio en porcentajes no mayores al 10%.

El proceso de producción es el mismo para todos los papeles producidos en puente alto. La receta o materia prima es lo que hace diferente a un papel de otro.

4.6.1.1 Higiénico 1

El análisis de demanda iónica se inicia estudiando el comportamiento del higiénico 1. Este papel representa poco menos del 50% de la producción total de papel Tissue en la planta de Puente Alto. En la Figura 15 se presenta el comportamiento de la demanda iónica a lo largo de tres días consecutivos de fabricación; y en Tabla 1 se puede apreciar la receta con la cual fue fabricado cada día.

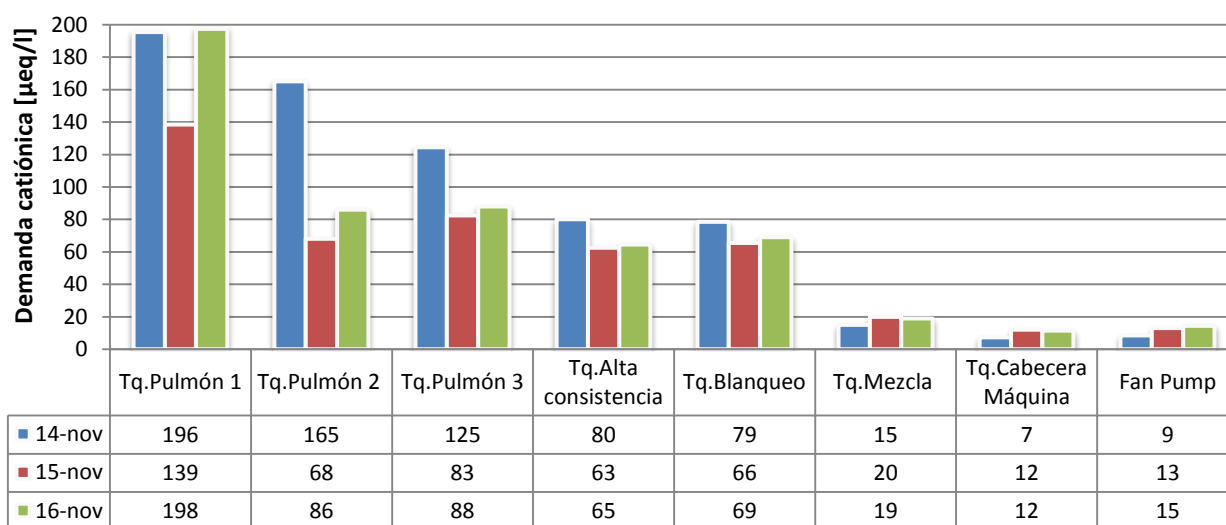


Figura 15: Perfil demanda catiónica higiénico 1.

Tabla 1: Receta higiénico 1.

14 noviembre	15 noviembre	16 noviembre
2 fardos blanco #2	2 fardos blanco #2	2 fardos blanco #2
2 fardos blanco #3	2 fardos blanco #3	2 fardos blanco #3
1/2 fardo de Duplex	1/2 fardo de Duplex	1/2 fardo de Duplex

El perfil de demanda catiónica del higiénico 1 presenta una tendencia decreciente desde el estanque pulmón 1 hasta el estanque de alta consistencia. Este

comportamiento se explica por la dosificación de silicato activado en los estanques pulmón 1, 2 y 3; junto con la acción de las etapas depurativas que anteceden los estanques pulmón 1, 3 y alta consistencia. El sistema de remoción de basura aniónica logra estabilizar la demanda catiónica en el estanque de mezcla en un valor promedio de 71 [$\mu\text{eq}/\text{l}$], siendo este un valor considerado estable y seguro según resultados esperados.

Si bien este papel fue fabricado a receta constante, de igual forma se observaron oscilaciones en la demanda catiónica a la salida de la depuración gruesa, lo cual indica que la concentración de basura aniónica no es constante en papelotes del mismo tipo.

Se destaca que el sistema de remoción de basura aniónica, tanto coladores como aditivos especializados, logren estabilizar la demanda catiónica en el estanque de blanqueo, aun cuando el estanque pulmón 1 presente cambios de hasta un 25% en sus niveles de demanda catiónica. Este hecho deja entrever que, al menos para papeles de calidad media, el sistema de remoción es robusto y capaz de sobrellevar perturbaciones en la calidad de los papelotes.

Desde el estanque de mezcla hasta la bomba *Fan Pump*, la demanda se estabiliza entre los 5 y 20 [$\mu\text{eq}/\text{l}$]. Este intervalo de operación se encuentra dentro del rango recomendado por expertos, ya que sugiere una baja aparición de depósitos adherentes y asegura una buena interacción de la pasta con la tela, paño y cilindro *Yankee*.

Se observa que la diferencia entre la demanda del estanque de mezcla y estanque cabecera de máquina es despreciable, dando a entender que existe una buena fijación del agente de resistencia sobre la fibra. Este resultado no asegura que la dosificación sea la óptima, pero sí descarta una pérdida de almidón en el agua bajo tela.

En resumen, el papel higiénico 1 presenta niveles adecuados de demanda catiónica según expertos y bibliografía. Además, no es posible apreciar problemas de dosificación de agentes de resistencia. El buen manejo operacional de este papel se explica por la vasta experiencia que tienen los operadores en su fabricación.

4.6.1.2 Higiénico 2

El estudio sigue con el levantamiento del higiénico 2. En la Figura 16 se puede observar el perfil de demanda iónica de este papel y la Tabla 2 indica la receta utilizada en su fabricación.

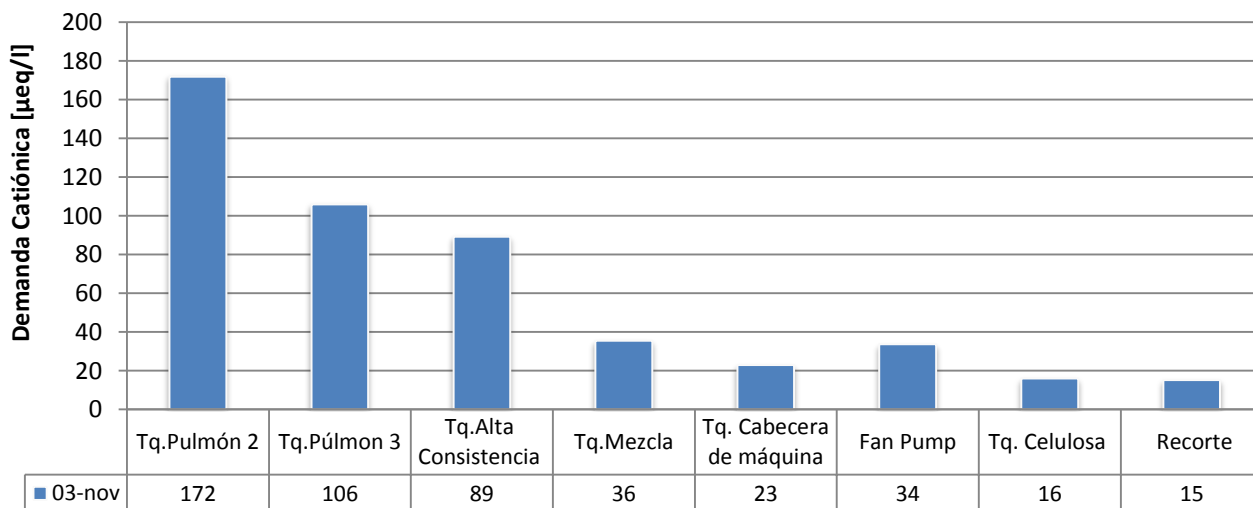


Figura 16: Perfil demanda catiónica higiénico 2

Tabla 2: Receta higiénico 2

03 noviembre
2 Fardo Blanco #2
2 Fardos Blanco #3
1 Fardo Revista
1000 [kg] Recorte

El perfil de demanda catiónica del higiénico 2 presenta la misma tendencia del higiénico confort y, por lo tanto, la misma tendencia esperada. No obstante, los valores se encuentran en promedio un 60% por sobre el perfil del higiénico 1, llegando incluso a duplicarlo en el estanque de mezcla, estanque cabecera de máquina y bomba *Fan Pump*.

De igual manera que para el higiénico 1, la demanda catiónica del higiénico 2 evidencia un buen desempeño de las etapas depurativas y del silicato activado. En el estanque pulmón 2, la demanda catiónica alcanza los 190 $[\mu eq/l]$ y posterior a las etapas depurativas, en el estanque de alta consistencia, la demanda se estabiliza bajo los 90 $[\mu eq/l]$. Este valor se encuentra al borde de lo sugerido por bibliografía y recomendado por proveedores.

La elevada demanda catiónica del higiénico 2, en comparación con el higiénico 1, tiene sustento en la diferencia de materia prima utilizada en ambos papeles. Al observar la Tabla 2, se evidencia que la única diferencia considerable entre la receta de ambos higiénicos es el reemplazo del medio fardo de duplex por 1 fardo de revista. Como ya se mencionó en la sección 2.2.2 Papelotes (fardo de papel reciclado)", el papelote denominado revista se compone de aproximadamente un 50% de papeles estucados

en base a pulpa mecánica, lo cual trae como consecuencia un aumento en los niveles de basura aniónica y demanda catiónica.

Nuevamente se observa que la variación entre la demanda del estanque de mezcla y estanque cabecera de máquina es mínima, lo que da a entender que el agente de resistencia se está fijando a la fibra y no se está desperdiciando en el agua removida o en la neutralización de basura aniónica.

Finalmente, la demanda catiónica de la bomba *Fan Pump* dista bastante de lo recomendado, siendo un 70% mayor a los 20 [$\mu\text{eq}/\text{l}$] sugeridos. Esto se contradice a lo reportado en los estanques que la anteceden, por lo que se deduce que este alto valor pudo haber sido causa de una contaminación puntual de la pasta o del agua de dilución de la bomba *Fan Pump*. De todas formas, se recomienda aumentar la dosis de silicato activado en las etapas depurativas con el fin de llegar con mayor holgura al estanque de alta consistencia.

4.6.1.3 Servilleta 1R

La servilleta 1R fue monitoreada dos veces al día, mañana (M) y tarde (T), durante 2 días a receta constante. En la Figura 17 se observa el perfil de demanda catiónica a lo largo de todo el proceso y en la Tabla 3 se visualiza la receta utilizada.

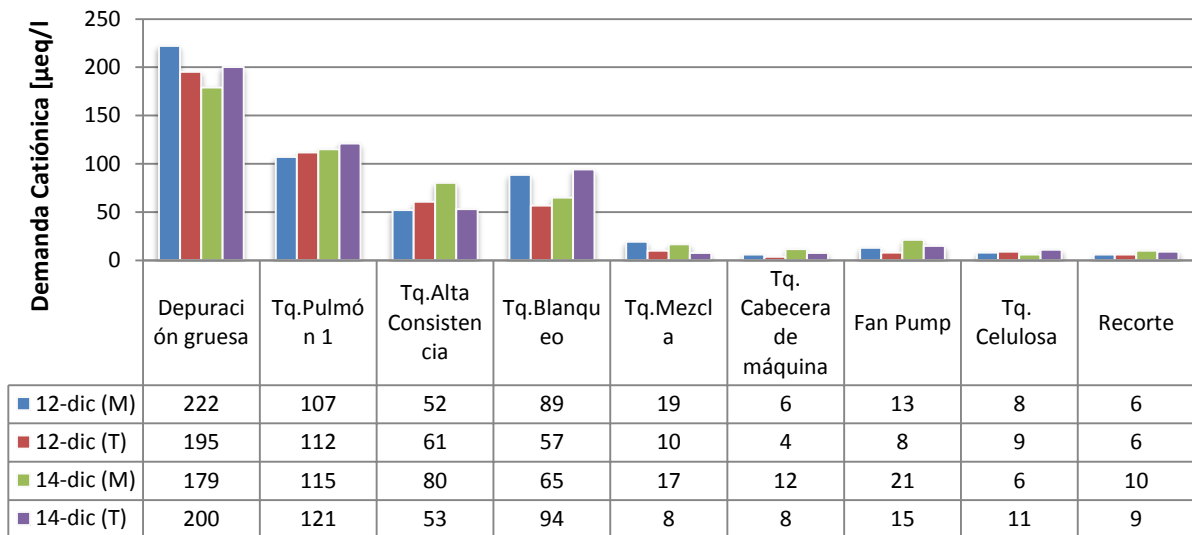


Figura 17: Perfil demanda catiónica servilleta 1R

Tabla 3: Receta servilleta 1R

12 diciembre (Mañana)	12 diciembre (Tarde)	14 diciembre (Mañana)	14 diciembre (Tarde)
1 fardo Blanco #2	1 fardo Blanco #2	1 fardo Blanco #2	1 fardo Blanco #2
1 fardo Blanco #3	1 fardo Blanco #3	1 fardo Blanco #3	1 fardo Blanco #3

1/2 fardo Duplex	1/2 fardo Duplex	1/2 fardo Duplex	1/2 fardo Duplex
2 fardo Recorte	2 fardo Recorte	2 fardo Recorte	2 fardo Recorte

Del análisis de la Figura 17 se desprende un buen funcionamiento de las etapas depurativas y de los aditivos captadores de basura coloidal. La demanda catiónica disminuye cerca de un 70% entre la depuración gruesa y el estanque de alta consistencia, situándose en éste último por sobre 76 [$\mu eq/l$] promedio. Este valor se encuentra dentro de lo esperado y recomendado por bibliografía y expertos.

La servilleta 1R tiene una receta similar a la del higiénico 1 (comparar Tabla 1, Tabla 3), por lo que es de esperar que ambos presenten, desde la disgregación hasta el estanque de mezcla, demandas similares, siendo la servilleta 1R levemente más alta a causa de la presencia de los 2 fardos de recorte.

A diferencia de lo que ocurre en el higiénico 1 y en el higiénico 2, la servilleta 1R posee dosificación de Cartabond. Este aditivo fuertemente catiónico es adicionado en su totalidad al estanque cabecera de máquina. A pesar de esto, no existe una diferencia mayor a 4 ó 5 [$\mu eq/l$] entre el estanque cabecera de mezcla y el estanque cabecera de máquina. Este hecho da a entender que existe una buena fijación de ambos agentes de resistencia, en caso contrario, la demanda hubiese sido cercana a cero o simplemente se hubiese invertido en el estanque cabecera de máquina.

Si bien se demuestra una buena fijación de agentes de resistencia en la fibra, no se puede asegurar que estos estén siendo dosificados de forma correcta. Está reportado que, a partir de un punto de dosificación, ambos agentes de resistencia comienzan a tener un efecto bajo y casi despreciable en las propiedades mecánicas del papel. Se ahondará en esto en las secciones siguientes. [37]

4.6.1.4 Sabanilla

La Sabanilla, para efectos de este trabajo, será considerada dentro de la categoría de toallas. La demanda iónica de este papel fue monitoreada durante dos días, tanto en la mañana (M), como en la tarde (T). En la Tabla 4 se visualiza la receta usada en la fabricación de la Sabanilla y en la Figura 18 se observa el perfil de demanda de ésta.

Para facilitar análisis de este perfil, es necesaria una aclaración; si bien la demanda catiónica es una medida de la carga superficial negativa de los coloides, por convención se ha tratado a lo largo de este trabajo con signo positivo. Ahora bien, con el fin de ser consecuente con esta convención, la reversión de carga observada en la Figura 18 se tratará como negativa.

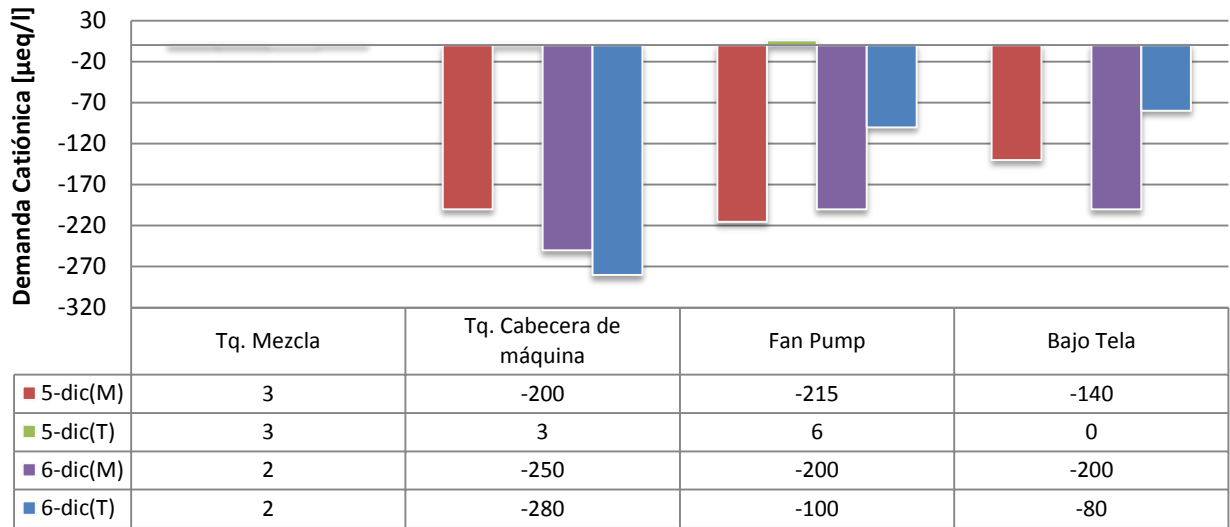


Figura 18: Perfil demanda aniónica Sabanilla

Tabla 4: Receta Sabanilla

5 diciembre (M)	5 diciembre (T)	6 diciembre (M)	6 diciembre (T)
Celulosa Virgen	Celulosa Virgen	Celulosa Virgen	Celulosa Virgen

Los datos de la Figura 18 afirman que durante los dos días de fabricación el sistema presentó demanda aniónica en lugar de catiónica. El día 5 de diciembre en la tarde es una excepción, ya que desafortunadamente la bomba de almidón fue dañada y estuvo fuera de servicio por 4 horas, siendo la medición de la tarde efectuada dentro de esa ventana de tiempo.

La causa de que el sistema coloidal tenga demanda aniónica es la dosificación excesiva de agentes de resistencia en seco y húmedo. Este carácter catiónico en la suspensión puede ser a causa de falta de tiempo para fijar los aditivos en la fibra, o bien, la fibra no es capaz de absorber esa cantidad de aditivos y esta es neutralizada completamente por los agentes de resistencia. De cualquier modo, durante la fabricación de Sabanilla, CMPC Tissue, planta Puente Alto, está desperdiciando agentes de resistencia.

Los problemas de dosificación hallados responden a dos causas: La primera, es la poca recurrencia con la que se fabrica este papel, llegando a un 2% o 3% de la fabricación anual total de papel Tissue y a un 7% de la fabricación de servilletas y toallas. La segunda causa corresponde a una particularidad del papel, que siendo 100% celulósico, tiene muy bajos niveles de basura aniónica, por lo que los aditivos pueden fijarse inmediatamente en la fibra y no son desperdiciados en neutralizar coloides aniónicos. Lamentablemente, el desconocimiento de lo ya mencionado lleva a operadores a aplicar dosis similares a las aplicadas en otros papeles con Cartabond, lo que se traduce en pérdidas de producto. [26]

Por medio de un balance de carga se puede estimar la cantidad de aditivo que se encuentra en exceso en el sistema coloidal, sin embargo, no es posible determinar cuánto corresponde exactamente a almidón y/o Cartabond, dado que la proporción real va a estar dada por la velocidad de reacción del complejo almidón-fibra y Cartabond-fibra. En la sección 5 Optimización del consumo de agentes de resistencia en papeles identificados con problemas de demanda iónica”, se hace énfasis en esta estimación y se corrige la dosificación en terreno durante una nueva fabricación de Sabanilla.

4.6.2 Demanda iónica línea de producción máquina papelera N°2

La máquina papelera N°2 suele trabajar con papeles de calidad baja, por lo tanto, es de esperar que presente niveles de demanda catiónica superiores a los observados en la línea de la máquina N°1. En esta línea productiva los flujos porcentuales de papel reciclado, celulosa y recorte (másica) son variados, por lo que en cada papel se hace mención a estos.

4.6.2.1 Toalla 1

La toalla 1 corresponde a un producto manufacturado con materia prima de baja calidad, libre de celulosa virgen y con porcentaje de recorte no mayor al 10%. En la Figura 19 es posible apreciar el perfil de demanda catiónica de la toalla 1 y en la Tabla 5 se presenta la receta utilizada.

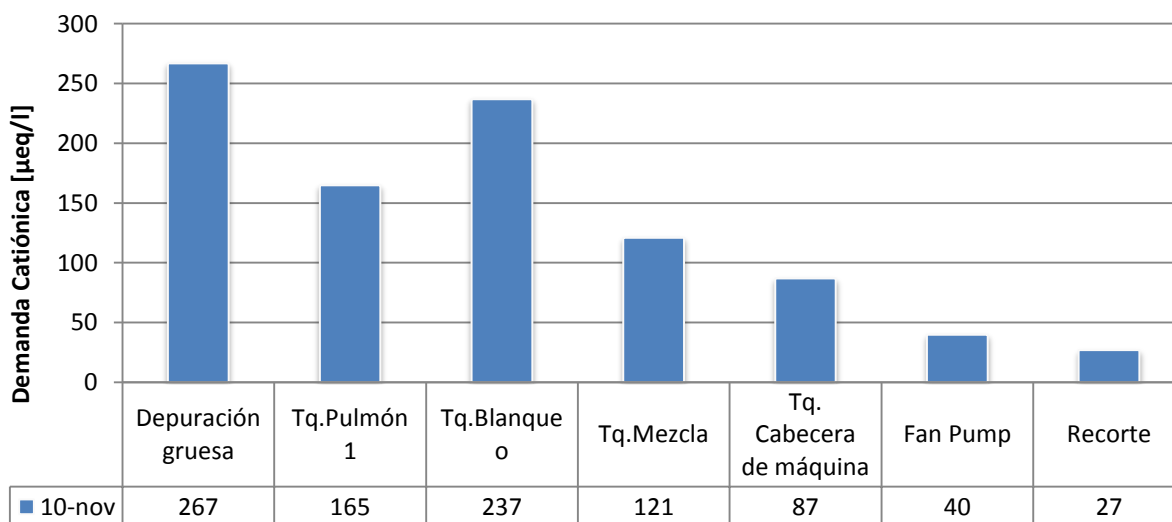


Figura 19: Demanda catiónica toalla 1

Tabla 5: Receta toalla 1

10 noviembre
1 Fardo de revista
1 Fardo de duplex
0,5 Fardo de corrugado
3 Fardo Blanco 3

El perfil de demanda catiónica de la toalla 1 es en su totalidad superior a cualquier papel estudiado con anterioridad. El estanque presenta una demanda de 121 [$\mu\text{eq/l}$], valor ocho veces superior a lo observado en el higiénico 1 y cuatro veces mayor al higiénico 2. Este hecho indica que las fases depurativas y el silicato activado son insuficientes en esta fabricación.

Llegar con altos niveles de demanda iónica al estanque de mezcla trae como consecuencia que los agentes de resistencia adicionados en el estanque cabecera de máquina sean desperdiciados en neutralizar la basura aniónica. Tanto el almidón como el Cartabond poseen grupos funcionales catiónicos, éstos son inactivados por la basura aniónica. Según la Figura 19, 34 [$\mu\text{eq/l}$] están neutralizando almidón y/o Cartabond.

Para hacer frente a este problema se propone utilizar un removedor de basura aniónica especializado en el estanque de mezcla. Un análisis técnico y económico de esta alternativa se presenta en la sección 7.2 Impacto económico: Adquisición de un removedor de basura aniónica”.

4.6.2.2 Toalla 2

La toalla 2 corresponde, al igual que la toalla 1, a una toalla en base a materia prima de baja calidad sin adición de fibra celulósica virgen. La Figura 20 muestra el perfil de demanda catiónica desde el estanque de mezcla hasta el agua bajo tela. Por otra parte, en la Tabla 6, se visualiza la receta utilizada durante la fabricación.

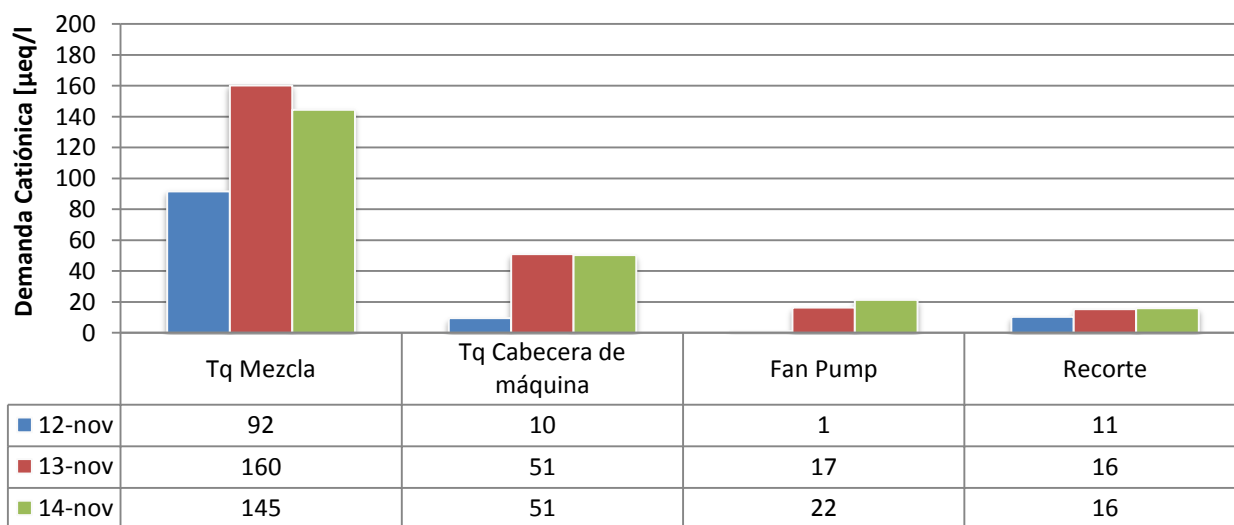


Figura 20: Demanda catiónica toalla 2

Tabla 6: Receta fabricación toalla 2

21 noviembre	22 noviembre	23 noviembre
1/2 fardo duplex	1/2 fardo duplex	1/2 fardo duplex
1/2 fardo Corrugado	1/2 fardo Corrugado	1/2 fardo Corrugado

En este papel, la concentración de basura aniónica neutralizada en el estanque cabecera de máquina por agentes de resistencia, es aproximadamente el triple que en la toalla Natural Institucional, llegando en promedio a los 91 [$\mu\text{eq/l}$]. Nuevamente las etapas depurativas y los aditivos captadores de basura coloidal no son adecuados para esta fabricación. La propuesta económica mencionada en la toalla 1 se puede extrapolar a este papel. El detalle se encuentra en la sección 7.2 Impacto económico: Adquisición de un removedor de basura aniónica”.

4.6.2.3 Servilleta 1T

La servilleta 1T corresponde a uno de los pocos papeles que es fabricado con recurrencia en ambas máquinas papeleras. El perfil de demanda se presenta en la Figura 21 y la receta utilizada en la Tabla 7. Es importante mencionar que, a diferencia de la servilleta 1R, esta fabricación cuenta con un 35% de papel reciclado y un 65% de celulosa o recorte.

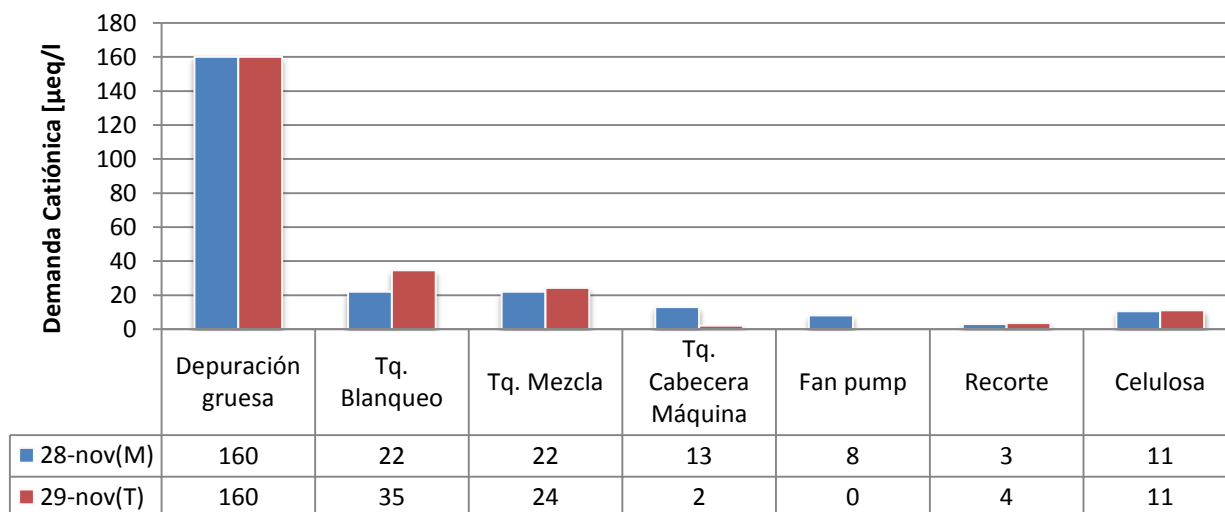


Figura 21: Demanda catiónica servilleta 1T

Tabla 7: Receta fabricación servilleta 1T

28 noviembre (M)	29 noviembre (T)
1 Fardo Blanco #1	1 Fardo Blanco #1
1/2 Fardo Blanco #2	1/2 Fardo Blanco #2
2 Fardo Recorte Blanco #2	2 Fardo Recorte Blanco #2

La diferencia entre la receta de fabricación de la servilleta 1R de la máquina N°1 con respecto a su símil Servilleta 1T (fabricada en máquina N°2) es el intercambio del fardo de blanco #2 por un fardo de blanco #1 y la sustitución del fardo de duplex por un fardo de recorte. Esta receta es de mejor calidad y presenta una menor concentración de basura aniónica que la receta de la máquina N°1.

En términos de demanda, el cambio de receta genera un impacto en el sistema, tanto en la depuración gruesa como en el estanque de blanqueo. En este último, la demanda catiónica es hasta 4 veces menor que su símil de la máquina N°1. De esto se deduce que, aun cuando la fabricación contenga mayor cantidad de papel reciclado, la demanda en el estanque se mezcla es similar en ambas máquinas papeleras debido a una mejor calidad de materia prima.

Por último, se observa que el día 29 de noviembre, la demanda de la bomba *Fan Pump* reportó valor cero. Este valor da indicios de una sobredosificación de agentes de resistencia y un posible problema operacional en máquina papeleras. Ante esto se procede a intervenir, inmediatamente, la dosificación de almidón y Cartabond. Los resultados de esta intervención son detallados en la sección 5 Optimización del consumo de agentes de resistencia en papeles identificados con problemas de demanda iónica”.

5 Optimización del consumo de agentes de resistencia en papeles identificados con problemas de demanda iónica

En la sección anterior se efectuó una evaluación del comportamiento de la demanda iónica de los principales papeles de cada máquina papelera. Este estudio determinó que tanto la sabanilla fabricada en la máquina N°1, como la servilleta 1T presentan demandas catiónicas cercanas a cero. Este fenómeno sugiere una adición excesiva de agentes de resistencia.

En la presente sección se disminuye la dosificación de almidón y/o Cartabond en ambos papeles identificados con problemas de demanda. El primer papel en estudio fue la servilleta 1T y su dosificación fue disminuida inmediatamente después que se detectó el problema. El segundo papel en estudio corresponde a la Sabanilla, en este caso la optimización en la dosificación fue obtenida de forma teórica, por medio de un balance de cargas en el estanque de mezcla.

5.1 Servilleta 1T

Para llevar a cabo la optimización, se cuenta con los informes del departamento de calidad y con la cooperación de un operador de máquina papelera. Este último disminuyó la dosificación de agentes de resistencia en la medida que los informes del departamento de calidad lo permitieron. El estudio se llevó a cabo entre el 28 y 30 de noviembre de 2016.

5.1.1 Requerimientos

Con el objetivo de entregar validez a los resultados obtenidos en este estudio, u otro similar, es importante asegurar que todos los elementos que influyen en la resistencia del papel sean mantenidos constantes, salvo claro, la dosificación de agentes de resistencia. En la sección 2.5.4 Propiedades mecánicas del papel” se menciona que estos factores son la potencia del refinador y la calidad de la fibra.

En la Tabla 8 se puede observar que la potencia del refinador se mantuvo constante en 24 [A] durante los tres días de medición.

Tabla 8: Potencia del refinador en fabricación de servilleta Elite.

Potencia	28-nov (M)	29-nov(T)	30-nov (M)	30-nov (T)
Amperes [A]	24	24	24	24

A diferencia de lo que ocurre con el refinador, no es posible asegurar que la calidad de la fibra se mantenga constante durante toda una fabricación. Entiéndase calidad de fibra, como el porcentaje de finos y el largo promedio de fibra presente en una suspensión papelera. En general, dos suspensiones paperas son consideradas de igual calidad cuando han sido obtenidas utilizando igual materia prima.

Para comprobar al supuesto anterior, se lleva a cabo un pequeño estudio, donde por medio de un medidor de tamaño de partículas, fue posible estudiar la variabilidad del tamaño de las fibras presentes en la bomba *Fan Pump*. En la Tabla 9, se muestra la receta cargada en el *Pulper* de papel reciclado durante la fabricación de servilleta 1T y la Tabla 10 muestra los resultados obtenidos en la cuantificación de calidad de fibra. El procedimiento de medición de fibra se encuentra en el Anexo C: Medición calidad de fibra.

Tabla 9: Receta fabricación servilleta 1T

28 noviembre (M)	29 noviembre (T)	30 noviembre (M)	30 noviembre (T)
1 fardo Blanco #1	1 fardo Blanco #1	1 fardo Blanco #1	1 fardo Blanco #1
1/2 fardo Blanco #2	1/2 fardo Blanco #2	1/2 fardo Blanco #2	1/2 fardo Blanco #2
2 fardo Recorte Blanco #2	2 fardo Recorte Blanco #2	2 fardo Recorte Blanco #2	-

Tabla 10: Caracterización de pasta en bomba *Fan Pump* en fabricación de servilleta 1R

Parámetro <i>Fan Pump</i>	28-nov	29-nov	30-nov (M)	30-nov (T)
Fibra promedio [μm]	400	425	407	421
Porcentaje de Finos [%]	95,3	93	96,2	94,2

Como se puede observar en Tabla 10, la calidad de la fibra se mantiene prácticamente constante entre los diferentes días de fabricación. Rigurosamente, el tamaño de la fibra promedio fue de 413 [μm] con una desviación estándar de 10,1 [μm]. Este valor representa una variación promedio del 2,4 % en la calidad de la fibra, lo cual es considerado despreciable. Por otra parte, el porcentaje promedio de finos fue de 94,6 % con una desviación estándar de un 1,2 %, valor que nuevamente es considerado poco relevante. Este pequeño estudio permite verificar que es adecuado considerar que la calidad de fibra es constante cuando las recetas son iguales o distan en pequeños detalles, como es el caso del 30 de noviembre en la tarde.

5.1.2 Resultados y discusiones

El cambio en la dosificación de aditivos se inició la tarde del 29 de noviembre, específicamente a las 19:00 [*hr*], minutos después de reportar que la demanda catiónica de la bomba *Fan Pump* había alcanzado valores nulos. El ejercicio de optimización consistió en disminuir los flujos de almidón y Cartabond adicionado en el estanque cabecera de máquina en la medida que los informes de calidad entregaran datos de resistencia entre el mínimo y el estándar.

En la Figura 22, Figura 23 y Figura 24 es posible apreciar que la disminución del flujo de agentes de resistencia hizo disminuir de forma considerable las propiedades mecánicas del papel fabricado (expresadas en gramo-fuerza [g]). En el caso de la resistencia longitudinal y transversal, los valores mínimos se reportaron a las 20:22 [*hr*]

y a las 22:31 [hr], en ambos casos las resistencias bajaron del estándar, siendo la resistencia transversal la más perjudicada. A diferencia de lo observado en las resistencias en seco, la resistencia en húmedo presentó su valor mínimo pasadas las 23:58 [hr], un muestreo posterior a lo observado en resistencia transversal y en húmedo. En ambos casos, los valores mínimos de resistencia coinciden con los mínimos de dosificación.

Cuando los valores de resistencia alcanzaron el mínimo, la dosificación fue aumentada en un 10%. Este cambio logró obtener papel con propiedades mecánicas superiores al mínimo y cercanas al estándar de producción.

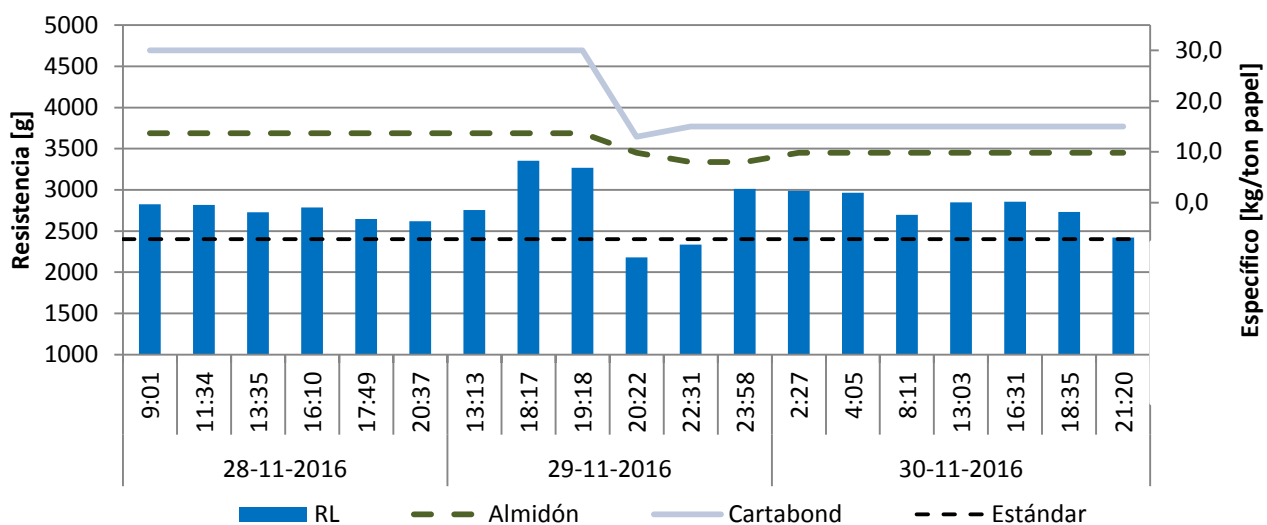


Figura 22: Resistencia longitudinal servilleta 1T ante cambios en la dosificación de agentes de resistencia

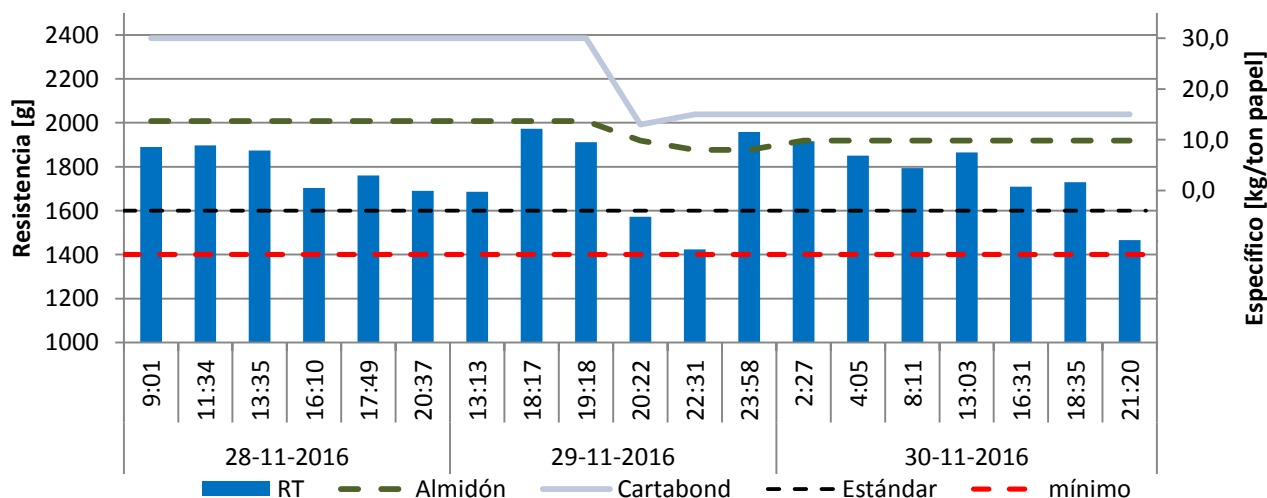


Figura 23: Resistencia transversal servilleta 1T ante cambios en la dosificación de agentes de resistencia

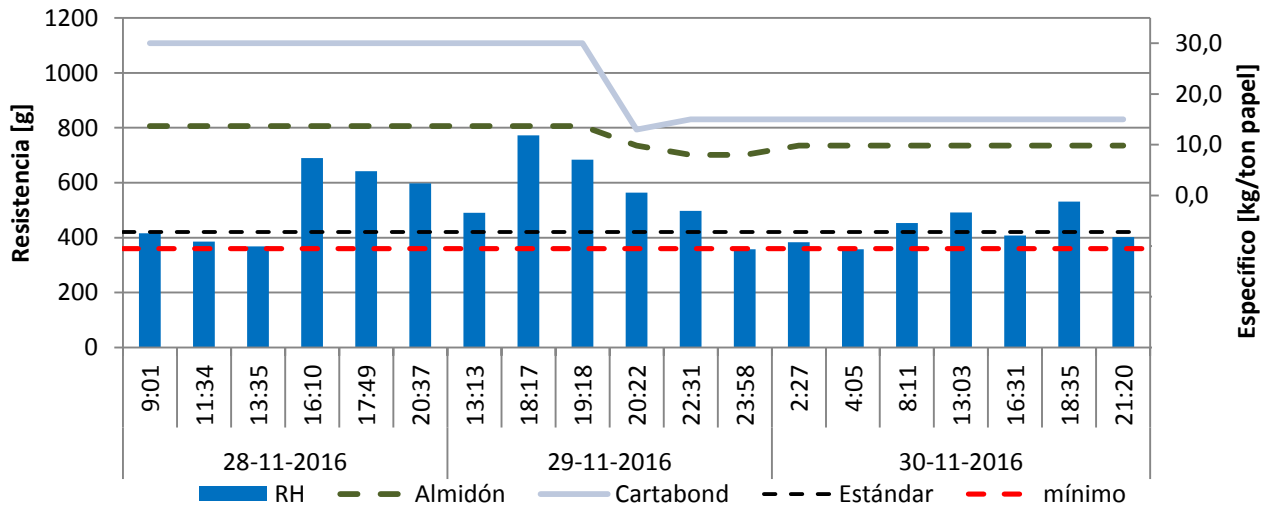


Figura 24: Resistencia en húmedo servilleta 1T ante cambios en la dosificación de agentes de resistencia

Al iniciar el proceso de optimización, la dosificación específica alcanzaba los 12 [kg/ton papel] para el almidón y los 30 [kg/ton papel] de Cartabond. Al finalizar el proceso, los valores disminuyeron un 25% y un 50% respectivamente, llegando a 9 [kg/ton papel] para el almidón y 15 [kg/ton papel] para el Cartabond.

Los resultados obtenidos aseguran que es posible sostener las propiedades mecánicas del papel a dosificaciones considerablemente más bajas. Ahora bien, con el fin de ratificar este buen resultado, se procede a comparar la dosificación promedio de almidón y Cartabond utilizada en esta fabricación, con la dosificación utilizada en fabricaciones previas. El resultado de esto es visible en la Figura 25.

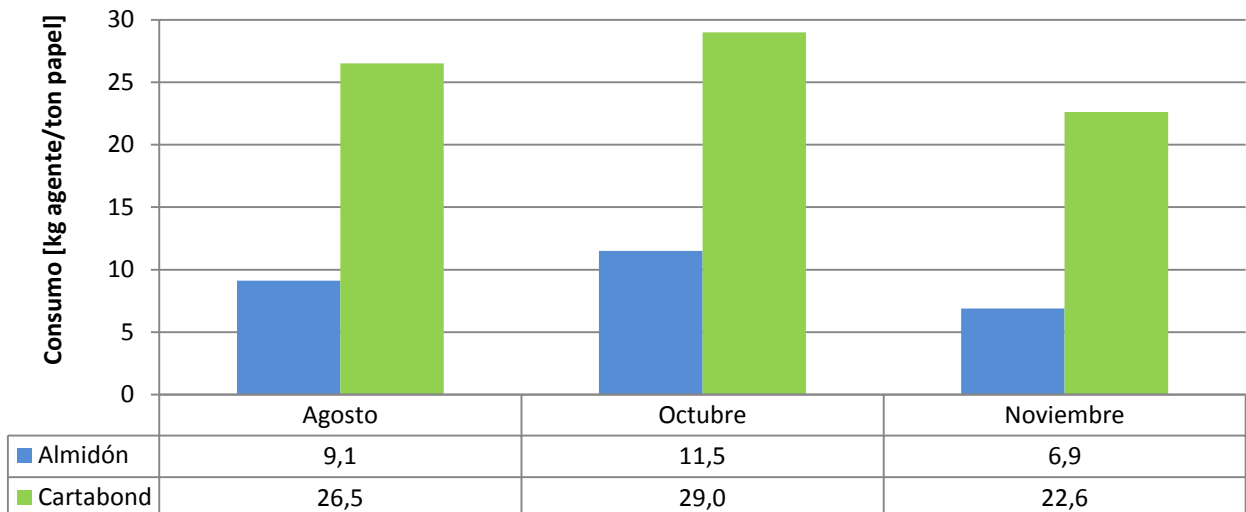


Figura 25: Consumo específico de agentes de resistencia servilleta 1T

La tendencia observada en la Figura 25 permite asegurar que es posible disminuir la dosificación de agentes de resistencia manteniendo las propiedades mecánicas del papel dentro de los estándares de producción. El consumo de almidón del mes de noviembre fue un 32% y 67% menor que el consumo de los meses de agosto y octubre respectivamente. Asimismo, el consumo de Cartabond de noviembre fue un 17% menor que el de agosto y un 28% menor que el de octubre. Cabe notar que el consumo reportado en noviembre corresponde al promedio de los tres días de fabricación, es decir, está considerando los días en los cuales no se intervino la dosificación, esto deja entrever que la dosificación promedio puede seguir disminuyendo.

Además de lograr una optimización en ambos agentes de resistencia, también fue posible estabilizar la demanda catiónica en la bomba *Fan Pump*. En la Figura 26 se observa que en los días posteriores a la intervención, la demanda tuvo un comportamiento cercano a lo esperado y reportado como óptimo.

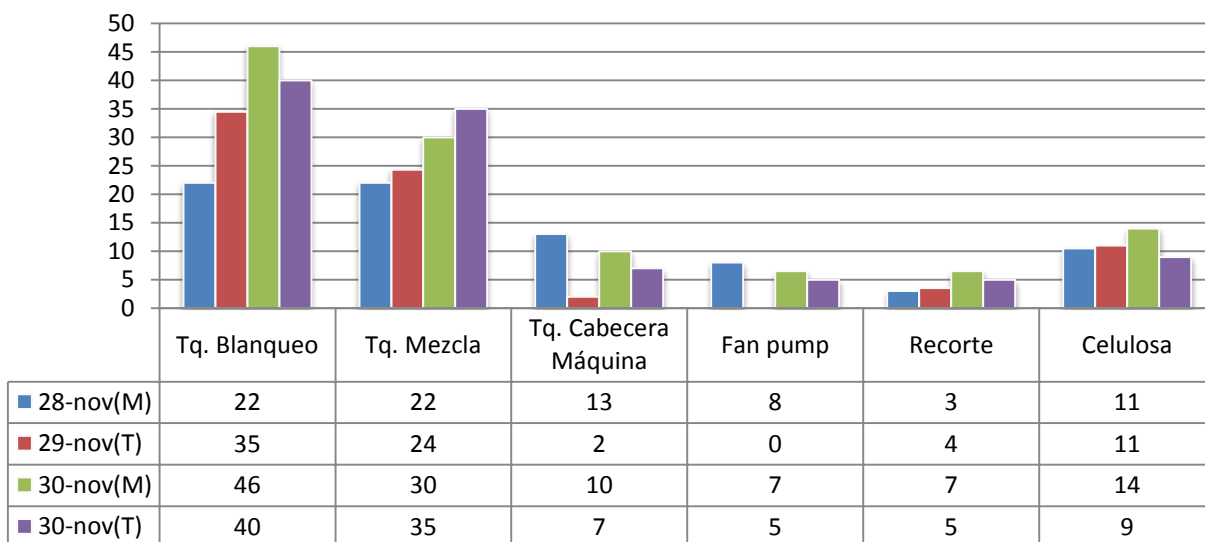


Figura 26: Demanda catiónica servilleta 1T antes y después de la intervención

Dado que fue posible disminuir dosificación de agentes de resistencia, es necesario ahondar en las razones que permitieron este descenso, para esto, se procede a comparar la dosificación promedio de cada mes con los valores de resistencia promedio respectivos. Estos resultados se presentan en la Tabla 11 y corresponde al promedio de las propiedades mecánicas de todos los *jumbos* analizados por el departamento de control de calidad.

Tabla 11: Promedio de propiedades mecánicas servilleta 1T.

	Resistencia en húmedo [g]	Resistencia Longitudinal [g]	Resistencia transversal [g]
Estándar	420	2.400	1.600
Agosto	490	2.647	1.737

Octubre	511	2490	1787
Noviembre	480	2802	1757

Los resultados indican que la relación entre el Cartabond adicionado se coincide con las resistencias en húmedo alcanzadas, en otras palabras, los meses que reportan mayor uso de Cartabond también reportan mayores resistencias en húmedo. Si bien este resultado pareciera intuitivo, no ocurre lo mismo con las resistencias longitudinales y transversales.

Aun cuando existe una gran oscilación en los consumos promedios de almidón, la resistencia transversal se mantiene prácticamente inalterable durante los meses en estudio, con una desviación estándar menor al 1%. Por otra parte, la resistencia longitudinal sigue una tendencia contraria a la esperada, ya que entre mayor cantidad de almidón se dosifica, menores son resistencias alcanzadas.

Este fenómeno se explica por la diferencia de afinidad y/o velocidad de reacción que existe entre los agentes de resistencia y la fibra. En el momento que el Cartabond es añadido en exceso, rápidamente reacciona con la fibra, dejando al almidón libre y obligándolo a reaccionar con la basura aniónica o con los pocos sitios activos vacíos presentes en la fibra. Por el contrario, cuando la dosificación de éste se controla, la fibra queda con sitios activos disponibles para el almidón. [34] [37]

Proveedores recomiendan dosificar el Cartabond y el almidón en estanques distintos, siendo este último dosificado primero debido a su menor densidad de carga y afinidad por la fibra. [34]

5.2 Sabanilla

El segundo papel reportado con problemas corresponde a la Sabanilla. Según datos de la sección 4, este papel presentó una inversión de carga y una sobredosificación de agentes de resistencia.

5.2.1 Metodología de optimización de agentes de resistencia

Por medio de un balance de carga, es posible corregir los flujos de agentes de resistencia adicionados durante la fabricación de Sabanilla. No obstante, no es posible determinar que porción corresponde a almidón y/o Cartabond. Para resolver este problema, se procede a establecer 3 escenarios distintos; En el primero, la sobredosificación solo corresponde a Cartabond; en el segundo, solo a almidón; y en el tercero, a una mezcla equitativa de almidón y Cartabond. Los resultados se presentan en la

Tabla 12. El detalle de este cálculo se encuentra en el Anexo D: Optimización Sabanilla”

Tabla 12: Escenarios posibles de sobredosificación Sabanilla

	Disminución de Almidón sugerida [l/h]	Disminución de Cartabond sugerida [l/h]
Escenario1	0	28,8
Escenario2	1.050	0
Escenario 3	14,4	525

Como se observa en la

Tabla 12, el primer caso supone que todo el Cartabond fue absorbido por la fibra, por ende, el almidón quedó remanente en el sistema coloidal; el escenario 2 es todo lo contrario, el almidón fue absorbido en su totalidad y el Cartabond quedó suspendido en el sistema coloidal; por último, el escenario 3 corresponde a un caso intermedio, donde no existe una diferencia de afinidad considerable entre el almidón y el Cartabond por la fibra.

Los 3 escenarios entregan estimados de dosificación posibles, el primero escenario sugiere disminuir la dosificación de Cartabond en un 20%, el segundo sugiere una disminución de 10% de Cartabond y 23% de almidón, y el último propone una disminución de 45% del almidón. (Porcentajes estimados en base a la dosificación estándar).

Si se determina qué escenario es el real, se puede modificar la dosificación en forma permanente. Lo más lógico sería converger a la dosificación del escenario 2, ya que corresponde al caso más conservador. No obstante, en la Tabla 13 se puede observar que la fabricación de diciembre, identificada con problemas, presentó un valor de promedio de resistencia en húmedo un 18% sobre el estándar y un 44% sobre el mínimo de fabricación; por otra parte la resistencia transversal estuvo un 13% en promedio bajo el estándar y apenas un 5% sobre el mínimo.

Tabla 13: Valores promedio de resistencia Sabanilla (diciembre)

	Resistencia Longitudinal [g] (RL)	Resistencia Transversal [g] (RT)	Resistencia en Húmedo [g] (RH)
Estándar	1.022	730	220
Mínimo	-	600	180
Diciembre	1.049	637	260

Los valores anteriores indican que el escenario más probable es el número uno, ya que no es factible disminuir la dosificación de almidón debido a que resistencia transversal está cercana al valor mínimo. En caso de validar este resultado, se podría confirmar

que el Cartabond tiene una mayor afinidad por la fibra y que dosificarlo en exceso afectaría las resistencias en seco.

Con estos antecedentes se procede a intervenir la dosificación de Cartabond según lo indicado por escenario 1. Es importante mencionar que la receta de este papel es 100% celulósica y que la potencia del refinador se mantuvo siempre entre 40 y 41 [A].

5.2.2 Resultados y discusiones

Como se puede observar en la Tabla 14, la dosificación promedio de Cartabond utilizada en febrero, fue en promedio 23 [l/h] menor que la dosificación de diciembre (un 80% de lo estimado por el balance de cargas). Asimismo, la dosificación de almidón no fue intervenida.

Es relevante mencionar que la demanda iónica se mantuvo constante entre 1 – 3 [$\mu\text{eq/l}$]. Ambos resultados permiten validar el método del balance de carga como herramienta útil en la intervención y optimización de productos iónicos.

Tabla 14: Dosificaciones promedio de almidón y Cartabond

	Flujo promedio Almidón [l/h]	Flujo de Cartabond [l/h]
Diciembre	158	1.442
Febrero	135	1.450

Para evaluar el impacto que tuvo la optimización en las propiedades del papel, es necesario comparar las resistencias mecánicas obtenidas en cada fabricación.

En la Tabla 15 observa un aumento considerable de la resistencia transversal y una disminución en la resistencia en húmedo. El cambio en la dosificación Cartabond no solo permitió que la resistencia en húmedo se estabilizara en el estándar, sino que igualmente fue capaz de aumentar la resistencia transversal, acercándola a mejores valores.

Tabla 15: Valores promedio de resistencia Sabanilla

	Resistencia Longitudinal [g] (RL)	Resistencia Transversal [g] (RT)	Resistencia en Húmedo [g] (RH)
Estándar	1.022	730	220
Mínimo	-	600	180
Diciembre	1.049	637	260
Febrero	1.037	717	215

El hecho de que la resistencia transversal haya aumentado sin necesidad de aumentar la cantidad de almidón, se explica por la competitividad que tienen ambos agentes de resistencia por los sitios activos de la fibra, este fenómeno es el mismo que presentó la

servilleta Elite previamente estudiada. En esta ocasión se ratifica que el Cartabond tiene una mayor afinidad por la fibra, reaccionando más rápido con ésta e impidiendo que el almidón tenga un real efecto.

Finalmente, solo basta comparar el consumo específico de almidón y Cartabond promedio del mes de febrero con diciembre. La idea de esta comparación, es cuantificar el impacto en la intervención de la dosificación. Este resultado se encuentra presente en la Figura 27 y es fácil observar que estos 23 [l/h] de disminución se traducen en una disminución de 4,1 [kg/ton], lo que corresponde a un 15% menos de la dosificación de diciembre.

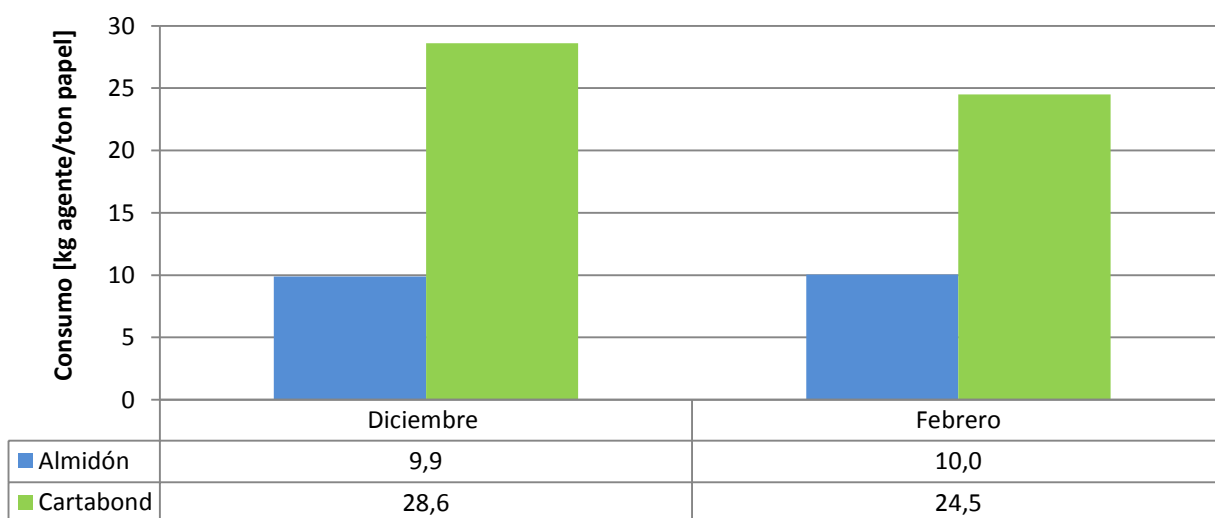


Figura 27: Consumo específico promedio de agentes de resistencia Sabanilla

6 Optimización del consumo agentes de resistencia en papeles sin problemas de demanda iónica.

Si bien el estudio de demanda catiónica reportó problemas en la fabricación de Sabanilla y servilleta 1T, estos papeles representan poco menos del 7% de la producción total de papeles en la planta, por lo que se hace difícil pensar que sean los únicos responsables de los problemas de sobreconsumo de almidón y Cartabond reportados por CMPC en el último tiempo.

El contexto del trabajo no permite la adquisición un equipo capaz de complementar las mediciones de demanda iónica. Es por esto, que se implementan diferentes medidas de control y capacitación con el objetivo optimizar el consumo de agentes de resistencia. A continuación, se detallan cada una estas.

Capacitaciones en terreno: Si bien cada papel tiene estandarizado el consumo específico de almidón y Cartabond a dosificar (7 kg de almidón/tonelada de papel) y 30 kg de Cartabond/tonelada de papel), los operadores y ayudantes de operadores desconocen cómo llevar el flujo de la bomba a consumo específico. En general, la dosificación de la mayor parte de los aditivos se realiza según la experiencia del operador.

Esta primera medida tiene como objetivo capacitar a los operadores y entregarles el conocimiento suficiente para que puedan dimensionar la cantidad de agentes de resistencia por tonelada de papel que se les exige adicionar.

Planillas de cálculo: Esta herramienta permite a los operadores conocer, de forma instantánea, la cantidad de aditivo que están adicionando por tonelada de papel producida. Corresponde a una planilla Excel de fácil uso. La interfaz de la planilla utilizada se encuentra presente en el Anexo E: Planilla Excel consumo específicos.

Planillas de control: En esta planilla los ayudantes de operador deben reportar el consumo específico de almidón y Cartabond al inicio y al final de cada turno. Esto permite tener controlados los consumos y evitar que existan diferencias considerables de dosificación entre turnos. En el Anexo F se encuentra la planilla implementada rellena con datos reales de operación.

Control en terreno: Consiste en supervisar y sugerir cambios en la dosificación de agentes de resistencia conforme las propiedades mecánicas del papel lo permitiesen. Esta medida supone un control de autogestión, donde los operadores deben aumentar o disminuir el consumo de agentes de resistencia a medida que se detecten resistencias por sobre o bajo el estándar. Esta medida logró ser sistematizada por al menos el 60% de los ayudantes de operador de máquina papelera.

Las cuatro medidas fueron implementadas durante los meses de diciembre, enero y febrero de 2016.

6.3 Resultados y discusiones

A continuación, se procede a analizar los resultados obtenidos consecuencias de medidas de control. Es importante mencionar que, tanto la potencia del refinador como la calidad de las fibras, se mantienen constantes en cada fabricación, salvo que se indique explícitamente lo contrario.

Las servilletas y toallas serán analizadas con mayor profundidad que los higiénicos, ya que las primeras cuentan con, además de almidón, la presencia de Cartabond.

6.3.1 Toalla 1

El primer papel a analizar corresponde a la toalla 1 manufacturada en la máquina N°2. Para visualizar y cuantificar el efecto que tuvo el sistema de control en la dosificación de agentes de resistencia en este papel, se compara el consumo de almidón y Cartabond

entre los meses previos y posteriores al inicio de la intervención. Los resultados se encuentran presentes en la Figura 28.

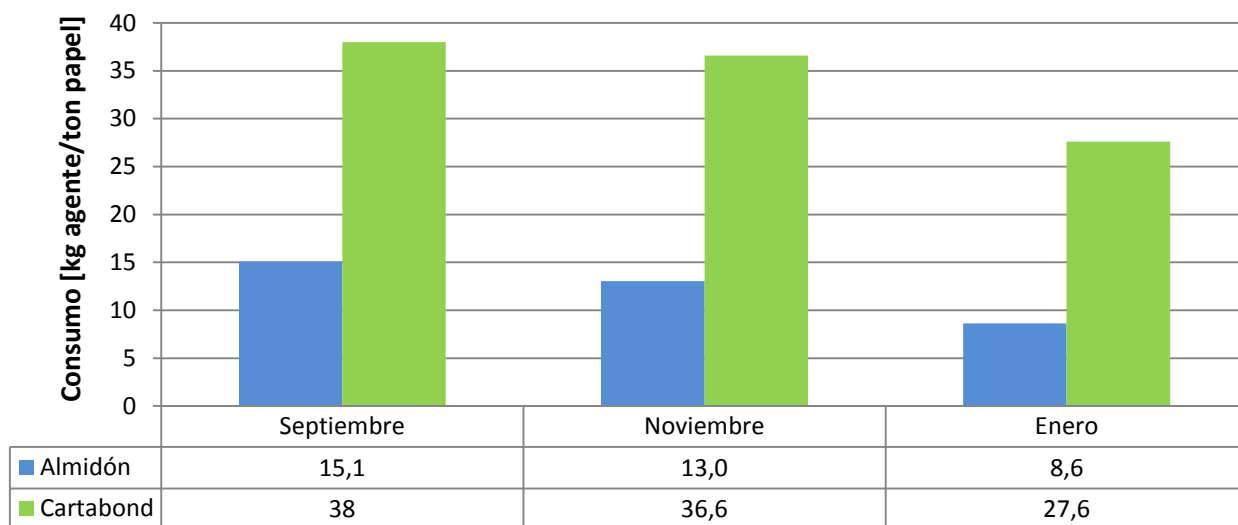


Figura 28: Consumo promedio agentes de resistencia toalla 1

El impacto que tuvieron las medidas de control en la toalla 1 resultó ser positivo. Si comparamos la fabricación del mes de enero con la fabricación de noviembre, (menor que la de septiembre), se infiere que el consumo de almidón disminuyó cerca de un 44%, mientras que el de Cartabond se redujo en un 25%. Esto conlleva a un ahorro de 4,4 [kg] de almidón y 9 [kg] de Cartabond por tonelada de papel producida.

Al igual que en la sección 5, resulta interesante cuantificar el impacto que tuvo la disminución de agentes de resistencia en las propiedades mecánicas del papel. Para esto se elaboró la Tabla 16 que resume los valores de resistencia en seco y húmedo de cada mes de fabricación.

De la Tabla 16 se desprende que las propiedades mecánicas de la toalla 1 se mantuvieron prácticamente inalterables cada mes, salvo quizás, la resistencia longitudinal del mes de enero, la cual disminuyó en un 8% y 9% con respecto a septiembre y noviembre respectivamente.

Tabla 16: Promedio propiedades mecánicas fabricación

	Resistencia en húmedo [g]	Resistencia Longitudinal [g]	Resistencia transversal [g]
Estándar	182	1.100	650
Septiembre	196	1.320	780
Octubre	200	1.332	763
Enero	194	1.222	771

En los papeles anteriormente analizados, no se había observado que la resistencia en húmedo se mantuviese inalterable frente a cambios en la dosificación de Cartabond. Este comportamiento se explica analizando la Figura 29.

Esta figura está presente en la literatura y representa la curva de respuesta de una suspensión de celulosa, previamente fibrilada, frente a la adición de poliamidoamina-epiclorhidrina (cuadrados) y dos resinas de características similares (círculos y triángulos). Para analizar de buena forma el gráfico, no está de más recordar que el flujo de Cartabond adicionado por CMPC Tissue, corresponde a una solución al 20% de poliamidoamina-epiclorhidrina.

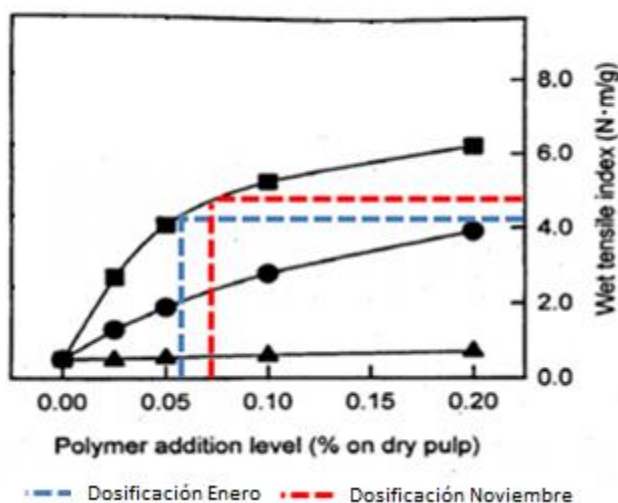


Figura 29: Curva de saturación de Poliamidoamina-epiclorhidrina comercial (cuadrados), Poliacrilamida (círculos) y Poliacrilamida aniónica (triángulos) [37]

La línea discontinua azul de la Figura 29 representa la dosificación promedio utilizada durante el mes de enero. Por otra parte, la línea discontinua roja corresponde a la dosificación del mes de noviembre. Es fácil apreciar que, a niveles por encima del 0,05% de poliamidoamina-epiclorhidrina, la curva respuesta de resistencia en húmedo comienza a presentar una pendiente cada vez menor. Es por esto que, aun cuando se adicione un 30% más de Cartabond, la ganancia en resistencia no supera el 6%. Esto explica de buena forma el comportamiento observado en la Tabla 16.

Si bien este papel no es fabricado con 100% de celulosa virgen, el punto de saturación no debería ser considerablemente distinto, dado que este tiene relación con los sitios activos de la fibra, por lo que en el peor de los casos, este punto se ubicaría a una concentración más baja (<0,05%), lo cual no afecta el razonamiento del análisis.

6.3.2 Servilleta Elite 1R

El siguiente papel a analizar corresponde a la servilleta 1R. Este papel no puede ser comparado con su símil de la máquina N°2, dado que ambas máquinas poseen

métodos de formación de hoja distintos. El resultado de este papel se puede visualizar en la Figura 30.

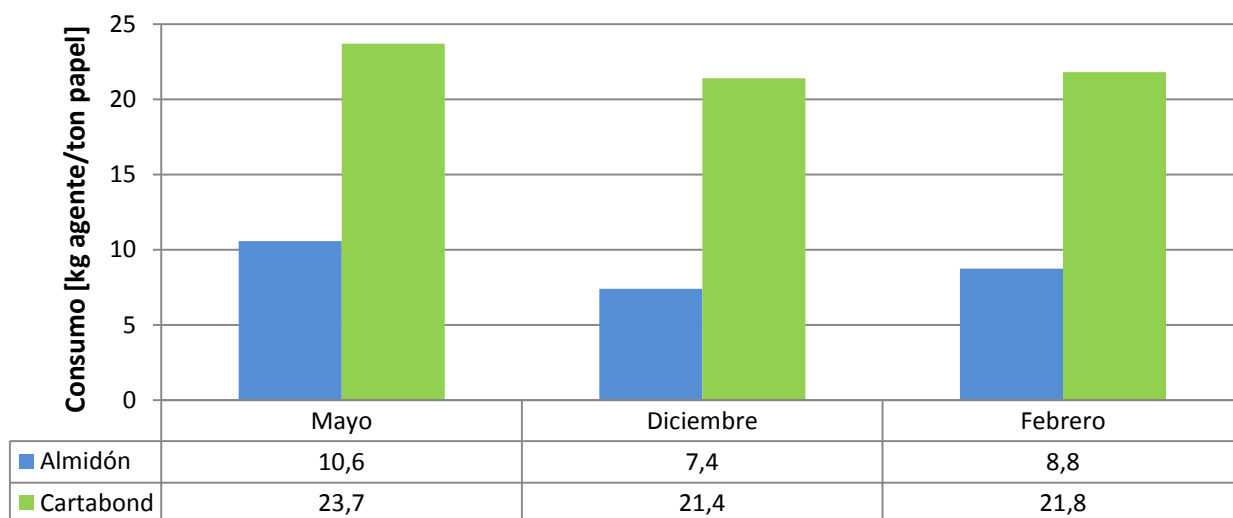


Figura 30: Consumo específico promedio agentes de resistencia

Al igual que para la toalla 1, el sistema de control tuvo un impacto favorable en el consumo de agentes de resistencia. El consumo de almidón disminuyó en promedio un 18% entre los meses de diciembre y enero, asimismo, el consumo de Cartabond disminuyó un 9% entre el mismo periodo. Siguiendo con la tendencia, se procede contrastar estas dosificaciones con las propiedades mecánicas obtenidas cada mes.

En la Tabla 17 se observa que en todas las fabricaciones las resistencias transversales y longitudinales se mantienen prácticamente invariantes a pesar de presentar oscilaciones en el consumo de almidón. Este fenómeno ya se había presentado antes y se explica por los sitios disponibles que deja el Cartabond en la fibra.

Tabla 17: Propiedades mecánicas servilleta 1R

	Resistencia en húmedo [g]	Resistencia Longitudinal [g]	Resistencia transversal [g]
Estándar	420	2.400	1.600
Mayo	575	2.632	1.756
Diciembre	466	2.688	1.635
Febrero	537	2..592	1.708

Llama la atención que los meses de diciembre y febrero hayan presentado iguales dosificaciones y distinto valor de resistencia en húmedo. Este comportamiento no se había observado en ningún papel con Cartabond antes. Es posible que haya existido una o más variables en el proceso que condicionaron este valor. No obstante, ahondar

en la razón exacta de este fenómeno solo sería especular. La única forma responsable de dar una explicación requeriría analizar una fabricación más, lo cual es inviable a causa del contexto de trabajo.

Aun cuando se haya presentado una anomalía en las propiedades mecánicas, este papel cumple de forma óptima con el objetivo del trabajo, se optimiza el consumo de ambos agentes de resistencia, manteniendo las propiedades mecánicas sobre el estándar de fabricación.

Por último, se destaca que la disminución en la dosificación del mes de diciembre, se haya mantenido durante febrero. Esto da a entender que las medidas de control tienen resultados sostenibles.

6.3.3 Toalla 3

La toalla 3 fue el único papel que no respondió de forma positiva al control de gestión, todo lo contrario, la dosificación de Cartabond aumento un 35% con respecto a la última fabricación. Los resultados se muestran en la Figura 31.

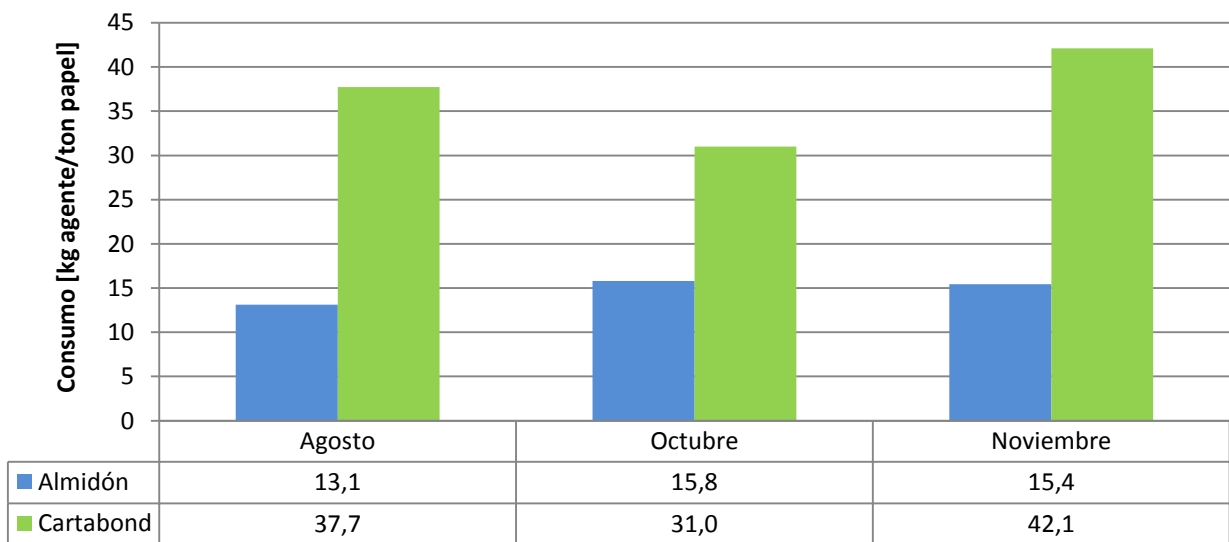


Figura 31: Consumo específico promedio de agentes de resistencia Toalla 3

El tratamiento operacional efectuado sobre la toalla 3 no tiene diferencia con el que se le dio al resto de los papeles. Sin embargo, durante la fabricación de este, los operadores reportaron problemas con los discos del refinador. Estos habían estado operando con problemas desde hace un tiempo y, por ende, su potencia había sido disminuida al 90%.

La toalla 3 representa un 21% del total de servilletas y toallas fabricadas en la planta, por lo que fallar en su control causa un fuerte impacto en los resultados de este estudio y desafortunadamente no fue posible estudiar otra fabricación.

6.3.4 Optimización en el consumo de almidón.

A diferencia de lo que ocurre con el Cartabond, el almidón catiónico es utilizado en todos los papeles fabricados por CMPC Tissue. Este hecho permite efectuar un análisis transversal del consumo de este aditivo, evitando así, el desglose individual realizado en servilletas y toallas. En la Figura 32 se observa el consumo específico mensual de almidón realizado durante los seis meses en los que se desarrolló este trabajo.

Es relevante recordar que la intervención en la dosificación y la implementación de los sistemas de control se iniciaron la segunda semana de diciembre. Los valores presentados se obtuvieron dividiendo el consumo mensual de almidón por la producción total del mismo mes.

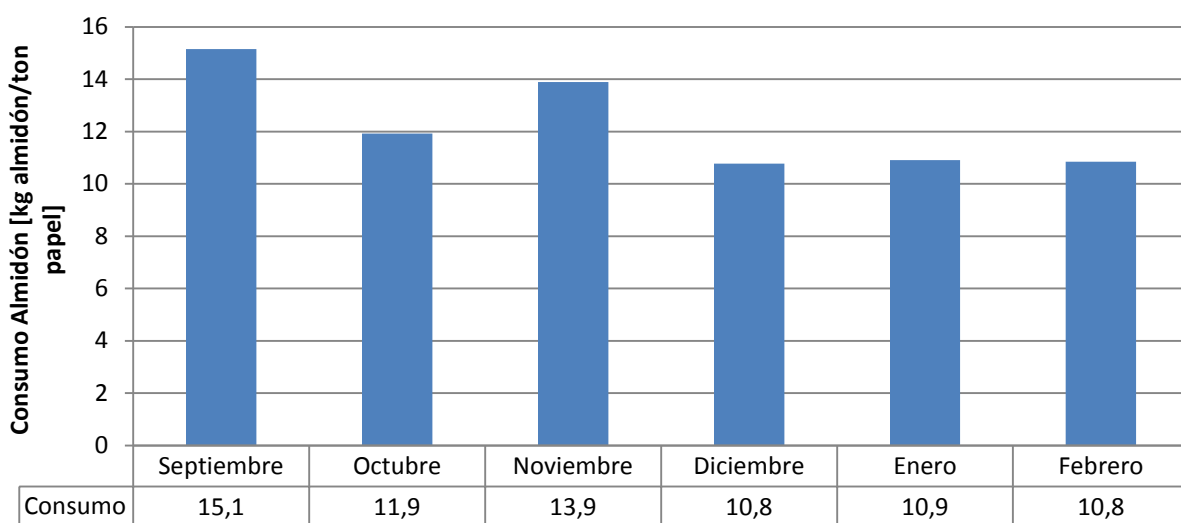


Figura 32: Consumo específico almidón catiónico.

En la Figura 32 se puede apreciar que a partir del mes de diciembre se presentó una clara tendencia a la baja en el consumo de almidón catiónico. En términos cuantitativos, el trimestre intervenido presentó una disminución de un 27% en el consumo almidón respecto al trimestre anterior. Esta disminución es resultado de las medidas de control y gestión desplegadas en terreno durante el último trimestre de trabajo y menor parte por la optimización desarrollada en la sección 5 Optimización del consumo de agentes de resistencia en papeles identificados con problemas de demanda iónica”.

Para validar este resultado es importante descartar que no haya existido una diferencia relevante entre los papeles fabricados durante el trimestre intervenido y el trimestre previo. Si bien todos los papeles debiesen usar la cantidad de almidón estándar, se ha demostrado que esto no ocurre, por lo que resulta obvio descartar alguna tendencia en la planificación del último trimestre.

Debido al carácter confidencial de los datos, se hace imposible desglosar en este informe la fabricación mensual de la planta, no obstante, es posible asegurar que esta se ha mantenido constante en higiénicos y ha tenido ciertas variaciones en toallas y servilletas. Es por esto último, que la empresa solicitó descartar que una mayor planificación de papeles con Cartabond haya influenciado los resultados y por lo cual pidió llevar a cabo un estudio correlativo entre el consumo de almidón y los días destinados a fabricar servilletas y toallas.

Para desarrollar este breve estudio es necesario calcular la cantidad de días al mes que fueron destinados a la fabricación de servilletas o toallas. Los días fueron ponderados por la producción promedio de cada máquina con el objetivo compensar sus distintas producciones diarias. Los resultados de esto se encuentran presentes en la Figura 17 y Tabla 18.

Tabla 18: Días promedio de fabricación de papeles con Cartabond

Meses en estudio	Días promedio de fabricación de toallas y servilletas	Consumo de Almidón [kg almidón/ton de papel]
Septiembre	6	15,1
Octubre	4,4	11,9
Noviembre	7,2	13,9
Diciembre	5,8	10,8
Enero	8,2	10,9
Febrero	9,4	10,8

A simple vista, los datos presentes en la Tabla 18 no dejan entrever ningún tipo de correlación. Con el objetivo de facilitar el análisis, los datos son graficados en la Figura 33 donde es posible descartar cualquier tendencia significativa.

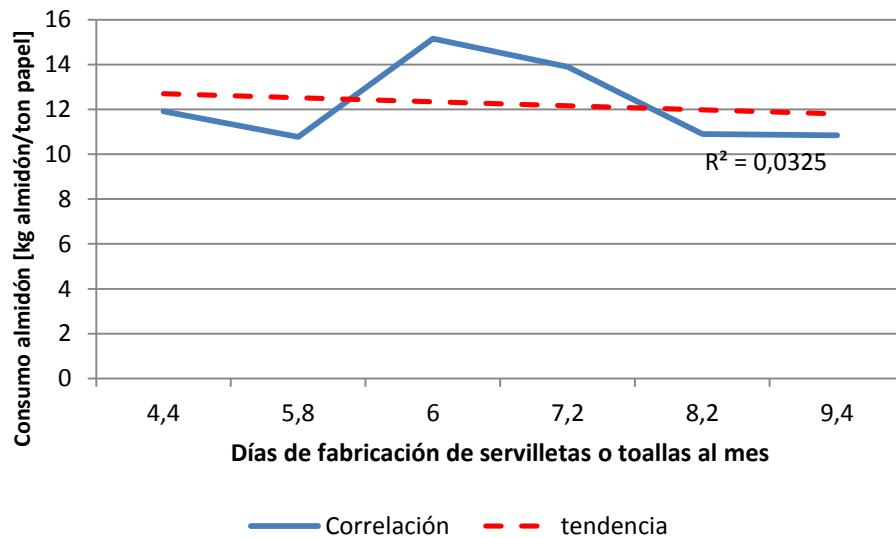


Figura 33: Correlación días fabricación servilletas o toallas y consumo de almidón

7 Impacto y proyección económica

7.1 Impacto económico: intervención en la dosificación.

En la siguiente sección, se cuantifica y proyecta el beneficio económico obtenido a consecuencia de la optimización en el uso de agentes de resistencia. Para esto, en la Tabla 19, se resumen los resultados obtenidos en toallas y servilletas.

Tabla 19: Cambio en la dosificación de Cartabond para toallas y servilletas

Papel intervenido	Fabricación no intervenida [kg Cartabond/ton papel]	Fabricación intervenida [kg Cartabond/ton papel]	Ahorro [kg Cartabond/ton papel]
Toalla1	36,6	27,6	9
Servilleta 1R	23,7	21,8	1,9
Servilleta 1T	29	22,6	6,4
Sabanilla	26,7	24,5	2,2

De acuerdo a datos de la empresa, los papeles intervenidos con éxito, constituyen el 57% de la producción total de toallas y servilletas, y a su vez, representan el 14% de la producción total de papel Tissue. Estos datos dejan entrever que, en términos de volumen productivo, la intervención en el consumo de Cartabond tuvo resultados exitosos.

A diferencia de lo que ocurre con el Cartabond, el almidón está presente de forma transversal en todos los papeles fabricados por CMPC Tissue. Es por esto, que la proyección económica anual se efectúa comparando los consumos del trimestre intervenido con el trimestre previo. Los resultados se visualizan en la Tabla 20 e indican una disminución de 2,8 [kg] de almidón por tonelada de papel producida.

Tabla 20: Cambio en la dosificación de almidón

Aditivo	Trimestre previo a la intervención [kg almidón/ton de papel]	Trimestre intervenido [kg almidón/ton de papel]	Ahorro [kg almidón/ton de papel]
Almidón Catiónico	13,7	10,9	2,8

Para proyectar el beneficio económico, es necesario conocer el nivel de producción anual que tendrá CMPC Tissue, planta Puente Alto. Para llevar a cabo esta estimación, se considera como producción anual total, los 12 meses comprendidos desde el 1 febrero de 2016 hasta el 31 de enero de 2017. Los datos de producción se encuentran en la Tabla 35 (confidencial, presente en Anexos), para efectos de cálculo se asume que la producción se mantendrá constante durante los próximos doce meses. Este supuesto es concordante con las proyecciones de la planta.

Antes de entregar una proyección económica anual definitiva, se procede a llevar a cabo un análisis de sensibilidad en 3 escenarios distintos; en el primero, escenario optimista, las medidas de control son mantenidas y los resultados obtenidos se extienden a toda la producción anual; en el segundo escenario, el conservador, los resultados sólo se mantienen en un 60%, es decir, no se logra efectuar un control total, principalmente por falta de interés del personal. Este porcentaje se obtiene por medio de una estimación del número de operadores que, sin planillas de control, mantuvieron controlados los niveles de dosificación. Por último, el caso pesimista, solo considera que el control es llevado a cabo en un 15%, dejando entrever una falta interés generalizada por parte de los operadores, exceptuando al turno D, turno pionero en todos los procesos de optimización. Los resultados se presentan en la Tabla 21. El desglose del cálculo se encuentra en el Anexo G: Impacto y proyección económica”.

Tabla 21: Ahorro promedio anual en agentes de resistencia

	100% de cumplimiento	60% de cumplimiento	15% de cumplimiento
Intervención Cartabond [US\$]	31.900	19.140	4.785
Intervención almidón [US\$]	78.100	45.860	11.715
Total [US\$]	110.000	66.000	16.500

Como se puede observar en la Tabla 21, en caso de mantenerse la producción, el ahorro anual en agentes de resistencia debiese llegar a los US\$ 119.000, lo cual es similar al costo de producción de un día de operación de la máquina N°1.

Ahora bien, considerando posibles problemas de mantención de equipos y la falta de motivación de algunos operadores, el escenario más probable se acerca al 60% de cumplimiento. Este escenario supone un ahorro de US\$ 66.000, lo cual, en términos productivos, representa un valor levemente superior al costo total de un día de producción de la máquina papelera N°2.

Por último, el escenario pesimista, contempla problemas operacionales recurrentes y un compromiso bajo por parte del personal operativo, generando un beneficio anual de US\$ 16.500. Este valor es equivalente al sueldo de un turno completo.

7.2 Impacto económico: Adquisición de un removedor de basura aniónica

En la sección 4, se propuso el uso de un aditivo removedor de basura aniónica en el estanque de mezcla, con el objetivo de evitar la pérdida de agentes de resistencia en el estanque cabecera de máquina.

Para evaluar la compra de este aditivo, se llevó a cabo una estimación económica que considera el beneficio de compra e implementación de un agente especializado en disminuir los niveles de demanda catiónica, previo a la adición de agentes de resistencia.

El producto en cuestión, fue cotizado en la empresa *SLK Chemicals*, quienes facilitaron las fichas técnicas, precio y el asesoramiento técnico necesario para la implementación de una Polydadmac de alta densidad de carga y bajo peso molecular. Para cada papel, la dosis de este aditivo fue estimada a partir de un balance de carga en el estanque de mezcla. Finalmente, los flujos necesarios son resumidos en la Tabla 22. El detalle de cálculo se encuentra en el Anexo H: Análisis técnico económico de las propuestas de mejora.

Tabla 22: Dosis estimadas de captadores de basura coloidal

Producto	Dosis de removedor de basura aniónica [l/h]
Toalla 1	2,2
Toalla 2	0,8

El costo de mantener estos flujos en operación debe ser menor al costo que conlleva la pérdida de almidón y/o Cartabond en ambos papeles. Para hacer esta comparación, es necesario conocer la cantidad de agentes de resistencia que se pierden a causa de los altos niveles de basura aniónica.

Se desconoce qué proporción de almidón y/o Cartabond es neutralizada por la basura aniónica, por lo cual, se procede a evaluar 2 escenarios posibles; en el primero, la basura aniónica es neutralizada solo por almidón, permitiendo que todo el Cartabond sea absorbido por la fibra. Por el contrario, el segundo caso considera que solo el Cartabond neutraliza la basura coloidal, permitiendo al almidón fijarse completamente en la fibra.

Si la propuesta de uso de captador de basura aniónica es económicamente superior a ambos casos, lo será para cualquier combinación de Cartabond y almidón posible. En la

Tabla 23 y Tabla 24 se observa el flujo de agente de resistencia desperdiciados por neutralización de basura aniónica. Todos los flujos estimados son posibles y no superan el 5 – 15 % de la dosificación total.

Tabla 23: Escenario 1 - Pérdida de almidón por altos niveles de basura aniónica

Producto	Pérdida de almidón [l/h]
Toalla 1	245
Toalla 2	93

Tabla 24: Escenario 2 - Pérdida de Cartabond por altos niveles de basura aniónica

Producto	Pérdida de Cartabond [l/h]
Toalla 1	6,8
Toalla 2	2,6

Una vez estimados los flujos, solo basta comparar el costo de operación de cada uno de ellos. Para esto, se considera beneficio económico de adicionar el nuevo aditivo cada hora y se multiplica por la cantidad de horas que se fabrica cada papel al año, el resultado se presenta en la Tabla 25. Se destaca que los costos operacionales del nuevo producto, tanto en bombas como en *pipiing*, son asumidos por el proveedor.

Tabla 25: Ahorro anual proyectado con la compra de un aditivo removedor de basura aniónica

	Papel	Disminución del consumo de aditivo [US\$/h]	Gasto [US\$/l]	Ahorro [US\$/h]	Ahorro anual [US\$]
Escenario 1	Toalla 1	7,4	5,5	1,1	870
	Toalla 2	2,8	2	0,5	435
Escenario 2	Toalla 1	5,2	5,5	-0,5	- 84
	Toalla 2	2	2	-0,2	- 34

Como se puede observar en la Tabla 25, el escenario 1 considera un ahorro anual de US\$1.305. Por el contrario, el escenario 2 contempla una pérdida anual de US\$ 118. Como se discutió en las secciones anteriores, el caso esperado tiende al escenario 1, en donde el Cartabond se fija a la fibra, y el almidón neutraliza la basura aniónica.

El escenario pesimista se ve influenciado por el bajo precio de compra del Cartabond. El contrato con el proveedor, es negociado por CMPC Tissue S.A, por ende, involucra grandes volúmenes de compra, lo que se traduce en bajos precios.

Aun cuando se proyecte un escenario optimista, el beneficio anual no es atractivo para la empresa, más aun, el nuevo aditivo conlleva problemas de stock y uso de bodega.

Finalmente, se descarta la adición de un nuevo producto en la fabricación de toalla 1 y 2.

8 Conclusiones

A partir del estudio de demanda iónica fue posible evaluar el nivel de demanda iónica en los principales papeles de cada línea productiva. Los papeles de calidad media, como el higiénico 1, Servilleta 1R, Servilleta 1T e higiénico 2 presentan adecuados niveles de demanda, llegando a estanque de mezcla y bomba *Fan Pump* en valores recomendados. Por el contrario, los papeles de calidad baja, como la toalla 1 y la toalla 2 presentan altos niveles de demanda catiónica en los estanques de mezcla y bomba *Fan Pump*, por consiguiente, se propone aumentar la dosis de silicato activado en las fases depurativas, o bien, reemplazar y/o complementar este aditivo con uno de mejor rendimiento.

Mediante un balance de cargas se estimó el flujo de removedor de basura aniónica, Polydadmac, necesario para evitar la pérdida de agentes de resistencia en los estanques de cabecera de máquina durante la fabricación de papales de baja calidad. Los flujos calculados corresponden a 2,2 [l/h] para la toalla 1 y 0,8 [l/h] para la toalla 2. Esta alternativa de dosificación sugiere un ahorro esperado optimista de US\$1.305 al año, lo cual corresponde a un valor marginal considerando las utilidades que maneja la empresa.

A partir del estudio de demanda iónica se logró identificar problemas de dosificación de agentes de resistencia en la servilleta 1T y en la Sabanilla de la máquina N°1. La servilleta 1T fue el primer papel optimizado y logró demostrar de forma empírica la factibilidad de disminuir la dosificación de agentes de resistencia, manteniendo en el estándar las propiedades mecánicas del producto. En este papel, la dosificación de Cartabond y almidón se disminuyó un 50% y un 25% respectivamente. Por otra parte, la Sabanilla contó con un estudio teórico que logró disminuir la dosificación de Cartabond en un 15%.

Las medidas de control hicieron posible disminuir un 25% el consumo de Cartabond en la servilleta 1R y un 9% en la toalla 1. Asimismo, en el trimestre diciembre, enero y febrero, se logró una disminución del 27% en el consumo de almidón respecto al trimestre anterior. El único papel que no respondió de buena forma fue la Toalla 3.

Finalmente, se lleva a cabo un estudio de impacto económico con el objetivo de cuantificar los efectos económicos de la optimización en agentes de resistencia. En esta evaluación se estudian tres escenarios, el optimista, pesimista y el esperado. Este último supone un ahorro mensual de US\$ 66.000, valor levemente superior al costo total de operación de un día completo de la máquina papelera N°2.

9 Bibliografía

- [1] CMPC S.A, 2017, Mi papel en CMPC, [En línea]. <<http://www.mipapelencmpc.cl/>> [Último acceso: 21 Septiembre 2016].
- [2] C. Negro, J. M.A. Blanco. 1997. Paper recycling An introduction to problem and their solutions. Belgica. Cost. 204p.
- [3] O. J. R. Gaona. 2000. Química del papel. Mérida, Venezuela. CENPAPEL. 191p.
- [4] A. Castello. Jefe preparación pasta CMPC Tissue. 2016. [Correo electrónico]. a.castello,@tissue.cmpc.cl
- [5] D. F. Orejuela. 2013. Optimización de dosificación de químicos catiónicos en la máquina papelerapor medio de estudios basados en el potencial Z, la demanda de carga y la conductividad. Ingeniero Químico. Universidad de Antioquia.
- [6] L. Bley y. R. Berger. 2010. Avances recientes en mediciones de carga en línea. Celulosa y papel. 21-29p.
- [7] R. Grenz, W. Dietz y D. Stumm. 2009. Surface charge determination for balancing charge quantities and modelling the reactivity of furnish for the effective application of wet strength agensys. Papermaking research symposium. 1-9p.
- [8] R. Román Machuca. 2008. Análisis de pérdida de fibra en la fabricación de cartulina. Ingeniería Mecánica. Valdivia. Universidad Austral de Chile.
- [9] L. Muñoz Aranda. 2014. Valoración de empresas CMPC. Magister en finanzas. Santiago. Universidad de Chile.
- [10] CMPC Tissue S.A, «CMPC Tissue,» [En línea]. Available: www.cmpctissue.cl. [Consulta: 23 Octubre 2016].
- [11] K Teschke y P. demers. 1996. Industria del papel y de la pasta de papel. En: Sectores basados en recursos biológicos. Washington.
- [12] J. Vargas. 2007. Informe estudio de papelotes Tissue S.A. Santiago.
- [13] CMPC. 2017. Tecno Tissue CMPC. <http://tecno.tissue.cmpc.cl/Tissue/Materias_Primas/Frame_Papelotes.html> [En línea]. [Consulta: 20 Octubre 2016]
- [14] C. A. echeverri. 2016. Funcionamiento depurador ciclónica. [En línea]

- <<http://www.mailxmail.com/curso-ciclones/principio-funcionamiento>> [Consulta: 26 septiembre 2016].
- [15] E. W. 1975. Sistema de dispersión con sistema doble tela, sistema de tornillos y dispersor. P technology.
- [16] E. Cadena Chamorro. 2008. Estudio del refinado de pastas de papel utilizando metodos biotecnológicos. Cataluña. Universidad técnica de Cataluña.
- [17] T. Mayer. 1987. Métodos de la industria química. Barcelona. Reverte. 244p.
- [18] O. J. R. Gaona. 2000. Química del papel. Mérida, Venezuela. CENPAPEL. 191p.
- [19] A. Sundenber, P. Mochiutti, Y. Ni y M. Hubbe. 2012. Dissolved and colloidal substances (DCS) and the charge demand of papermaking process waters and suspensions. [En línea]. <www.Biosources.com> [Consulta: 24 Agosto 2016]
- [20] J. Verdaguer, G. Lopez. 2003. Agentes de resistencia en seco: Almidón Catiónico. [En línea] < <http://www.riadicyp.org/agentes-de-resistencia-en-seco-almidon-cationico>>. [Consulta: 5 Diciembre 2016]
- [21] X. Sequera Rahola. 2003. Agentes de resistencia en húmedo. [En línea]. <<http://www.riadicyp.org/agentes-de-resistencia-en-humedo>>. [Consulta: 5 de Diciembre 2016]
- [22] A. Abril y G. Mogollon. 2010. La química del papel. En: Recilado Celulósico. 148-192p.
- [23] S. Tyagi. R. Tyagi. Y sood. 2010. Surface charge of different paper making raw materials and its influence on paper properties. *Journal of Scientific and Industrial Research*. vol. 69, pp. 300-304.
- [24] J. E. Singey. 2007. Teoria de coagulación del agua. [En línea]. Gainseville, Florida. <<http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacd/scan/02554-coagulacion.pdf>>. [Consulta: 25 Septiembre]
- [25] Departamento de calidad CMPC Tissue. 2016. Rechazo máquinas convertidoras. [Correo electrónico]
- [26] R. Morales. Jefe de ingenieria de procesos, CMPC Tissue. 2016. Información operacional. [Correo Electrónico]. amoral1@uc.cl
- [27] Borotecsca. 2012. Articulos de Filtraión.[En línea]. www.borotecsca.cl. [Consulta: 30

Agosto 2016].

- [28] Reicotex. 2009. [En línea]. <www.reicotex.cl>. [Consulta: 30 Agosto 2016].
- [29] BTG. 2006. www.btg.com. [En línea]. <www.btg.com>. [Último acceso: 2016 Agosto 30].
- [30] BTG Mutek GmbH. 2003. Operation Manual PCD03/PCD03 ph. [Manual Operacional].
- [31] S. Kirilova y S. Lindberg. 2012. Sticky deposits in a Tissue Manufacturing Process. Maestro en ciencias. Goterberg, Suecia. Chamrles University Technology.
- [32] S. Farris, L. Mora, G. Capetri y L. Piergiovani. 2012. Polyelectrolyte titration pulp, paper and board. Scandainavian pulp, paper, and Board. 121-124p.
- [33] R. M. Carreño. 2009. Caracterización y eliminación de la materia disuelta y coloidal en la fabricación de papel reciclado. Ingeniero Químico. Madrid. Universidad Complutense de Madrid.
- [34] O.Slobodiuk. Gerente General SLK Chemicals. 2016. Información aditivos catiónicos. [Correo Electrónico]. Osvaldo.Slovodiuk@chemicals.com
- [35] J. Reyes y J. Schuffenegger. 2005. Control on line de coloides planta santa fe. [En línea]. Concepción.<http://www.eucalyptus.com.br/icep02/reyes_schuffenegger.pdf> [Consulta: 4 Octubre 2016]
- [36] I. R. y. A. O. M. Ricard. 2005. Pectinase reduces the cationic demanda of peroxide bleached TMP. A paper Machine Trial. Pulp and paper Canada. 106p.
- [37] T. Lindstrom, L Wagberg y T. Larson 2005. On the nature of joint strength in paper: A review of dry and wet strength resins used in paper manufacturing. STFI. PACKFORSK. 132p.

10 Anexos

Anexo A: Memoria de cálculo consumo específico de aditivos

El sistema de control de CMPC Tissue planta Puente Alto, no tiene automatizado el cálculo de dosificación específica de agente de resistencia en húmedo y en seco, más aún, el cálculo de dosificación de Cartabond se lleva a cabo de forma manual en el punto de dosificación.

Para llevar a cabo el cálculo específico de dosificación se debe considerar la velocidad del pope, el gramaje del papel a producir el formato de salida del papel en máquina y la densidad del agente de resistencia en húmedo o la concentración de almidón. La simbología de estos parámetros se encuentra presente en la Tabla 26.

Tabla 26: Parámetros necesarios para el cálculo de consumos específicos.

Simbología	Parámetro
$D_{aditivo} [l/h]$	Dosificación de aditivo (RH o Almidón)
$v_{pope} [m/min]$	Velocidad de pope
$L_{formato} [m]$	Formato de salida
$\rho_{RH} [kg/l]$	Densidad de Agente de resistencia en húmedo (RH)
$E_{aditivo} [kg/ton]$	Consumo específico de aditivo
$g_{papel} [g/m^2]$	Gramaje del papel a fabricar
$C_{almidón} [g/l]$	Concentración de almidón

La ecuación que determina el consumo de agentes de resistencia está dada por la ecuación 2 y 3.

$$E_{Almidón} = \frac{D_{almidón} \left[\frac{l}{h} \right] \cdot C_{almidón} \left[\frac{g}{l} \right]}{v_{pope} \left[\frac{m}{min} \right] \cdot L_{formato} [m] \cdot g_{papel} \left[\frac{g}{m^2} \right] \cdot 60 \left[\frac{min}{h} \right] \cdot \frac{1}{1 \cdot 10^6} \left[\frac{ton}{g} \right]} \quad (2)$$

$$E_{RH} = \frac{D_{RH} \left[\frac{l}{h} \right] \cdot \rho_{RH} \left[\frac{kg}{l} \right]}{v_{pope} \left[\frac{m}{min} \right] \cdot L_{formato} [m] \cdot g_{papel} \left[\frac{g}{m^2} \right] \cdot 60 \left[\frac{min}{h} \right] \cdot \frac{1}{1 \cdot 10^6} \left[\frac{ton}{g} \right]} \quad (3)$$

Considerando los datos obtenidos para la Sabanilla, fabricada el 5 y 6 de diciembre, se procede a calcular el específico de Almidón y RH a las 12:30 hr del día 5 de diciembre. Los datos medidos a esa hora corresponden a:

Tabla 27: Valor parámetros cálculo consumo específico

Simbología	Parámetro
$D_{aditivo} [l/h]$	960 [l/h]
$v_{pope} [m/min]$	930 [m/min]

$L_{formato}$ [m]	2,73[m]
ρ_{RH} [kg/l]	1,04 [kg/l]
g_{papel} [g/m ²]	38 [g/m ²]
$C_{almidón}$ [g/l]	0,04 [kg/l]

$$E_{Almidón} = \frac{960 \left[\frac{l}{h} \right] \cdot 0,04 \left[\frac{kg}{l} \right]}{930 \left[\frac{m}{min} \right] \cdot 2,73[m] \cdot 38 \left[\frac{g}{m^2} \right] \cdot 60 \left[\frac{min}{h} \right] \cdot \frac{1}{1 \cdot 10^6} \left[\frac{ton}{g} \right]} = 6,63 \left[\frac{kg}{ton} \right]$$

$$E_{RH} = \frac{152 \left[\frac{l}{h} \right] \cdot 1,04 \left[\frac{kg}{l} \right]}{930 \left[\frac{m}{min} \right] \cdot 2,73[m] \cdot 38 \left[\frac{g}{m^2} \right] \cdot 60 \left[\frac{min}{h} \right] \cdot \frac{1}{1 \cdot 10^6} \left[\frac{ton}{g} \right]} = 27,3 \left[\frac{kg}{ton} \right]$$

Finalmente, los consumos específicos corresponden a 6,6 [kg/ton] de almidón y 27,3 [kg/ton] de Cartabond.

Anexo B: Ejemplo de medición y cálculo de demanda catiónica

A continuación, en la Tabla 28, Tabla 29 y Tabla 30 se pueden observar las titulaciones de carga del estanque de mezcla de la servilleta 1T. Los resultados obtenidos, con respecto a demanda catiónica, corresponden al promedio de tres medidas consecutivas.

La medición se inicia introduciendo 10 [ml] de muestra en el vaso medidor del Mutek PCD03, este equipo reporta un potencial negativo medido en mili volts [mV]. A medida que se agrega el titulador catiónico de densidad de carga conocida (0,001 [N]) el potencial comienza a disminuir. La medida finaliza, cuando el potencial alcanza el cero. Es importante esperar 60 segundos antes de adicionar la primera gota de Polydadmac y 30 segundos entre cada medición.

Tabla 28: Tabla resumen titulación estanque de mezcla. Medición N°1.

Potencial [mV]	Polydadmac adicionado [ml]	Tiempo de estabilización [s]
-130	0	0
-78	0	60
-38	0,14	30
-10	0,22	30
-3	0,26	30
0	0,28	30

Tabla 29: Tabla resumen titulación estanque de mezcla. Medición N°2

Potencial [mV]	Polydadmac adicionado [ml]	Tiempo de estabilización [s]
-79	0	0
-54	0	60
0	0,21	40

Tabla 30: Tabla resumen titulación estanque de mezcla. Medición N°3

Potencial [mV]	Polydadmac adicionado [ml]	Tiempo de estabilización [s]
-130	0	0
-67	0	60
-27	0,2	40
0	0,24	40

El promedio de Polydadmac agregado corresponde a 0,23 [ml]. Para llevar este valor a unidades de equivalentes por litro ($[\mu eq/l]$) es necesario considerar la densidad de carga del Polydadmac y el volumen inicial de la muestra. La ecuación 4 indica como calcular la demanda iónica a partir de los datos mencionados.

$$N_{muestra} \left[\frac{\mu eq}{l} \right] = \frac{V_{titulante} [l] \cdot N_{titulante} \left[\frac{\mu eq}{l} \right]}{V_{muestra} [l]} \quad (4)$$

Reemplazando:

$$N_{muestra} \left[\frac{\mu eq}{l} \right] = \frac{0,00023[l] \cdot 1000 \left[\frac{\mu eq}{l} \right]}{0,01[l]} = 23 \left[\frac{\mu eq}{l} \right]$$

Finalmente, la demanda catiónica reportada en el estanque de mezcla de la máquina N°1 durante la fabricación de servilleta Elite corresponde a $23[\mu eq/l]$.

Anexo C: Medición calidad de fibra.

Para poder cuantificar la calidad de la fibra con la que se fabrica la hoja de papel, se utiliza el equipo *Morfi Compact*, el cual entrega una distribución del tamaño de fibra y finos presente en una suspensión acuosa.

Las muestras son obtenidas de la suspensión acuosa muestreada desde la bomba *Fan Pump*. Para llevar a cabo la medida, solo se deben diluir 5 [ml] de la muestra en 1 [l] de agua potable, luego se introduce la solución en el recipiente de medición y se enciende el equipo.

Anexo D: Optimización Sabanilla

En esta sección se procede a estimar la dosificación de agentes de resistencia que aseguren mantener inalterable las propiedades mecánicas del papel. Para esto se procede a desarrollar un modelo sencillo a partir de un balance de carga en el volumen de control de la Figura 34.

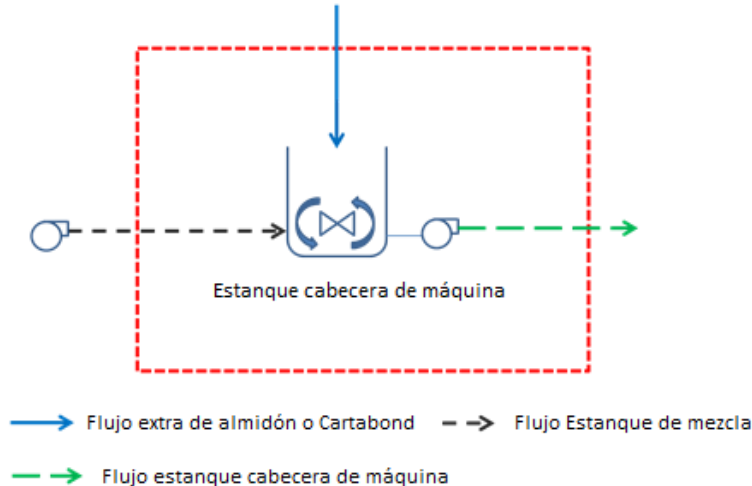


Figura 34: Volumen de control considerado para balance de carga

Antes de plantear el modelo, es necesario definir los parámetros a utilizar. En la Tabla 31 se presentan éstos, con sus respectivas unidades y simbología.

Tabla 31: Parámetros utilizados en balance de carga

Simbología	Parámetro	Valor
V_C	Volumen del estanque cabecera de máquina	$[m^3]$
ρ_C	Demanda aniónica estanque cabecera de máquina	$[\mu eq/l]$
F_e	Flujo de entrada al estanque cabecera de máquina	$[l/h]$
F_s	Flujo de salida del estanque cabecera de máquina.	
ρ_e	Demanda catiónica flujo de entrada al estanque cabecera de máquina. (Estanque de mezcla)	$[\mu eq/l]$
F_{RH}	Flujo extra de Cartabond.	$[l/h]$
F_A	Flujo extra de Almidón.	$[l/h]$
ρ_A	Demanda aniónica almidón	$[\mu eq/l]$
ρ_{RH}	Demanda aniónica Cartabond.	$[\mu eq/l]$

El balance queda representado por la ecuación 5:

$$\frac{dV_C \cdot \rho_C}{dt} = F_e \cdot \rho_e - F_s \cdot \rho_C + F_A \cdot \rho_A + F_{RH} \cdot \rho_{RH} \quad (5)$$

Para simplificar la resolución de la ecuación 5 es necesario tomar ciertos supuestos. A continuación, se ahonda en estos.

- Primer supuesto: El sistema se encuentra en estado estaciona, lo cual es coherente con el contexto productivo de la empresa.
- Segundo supuesto: La demanda aniónica del estanque cabecera de máquina es constante e igual $243 [\mu eq/l]$. Este valor corresponde al promedio de lo reportado en la Figura 18.
- El tercer supuesto considera que los flujos de almidón y Cartabond son despreciables con respecto al flujo de pasta ($F_e, F_s \gg F_A, F_{RH}$). Esto implica que el flujo de entrada al estanque cabecera es igual al flujo de salida del mismo ($F_e = F_s = F$).

Finalmente, la ecuación queda determinada por la ecuación 6. Los subíndices están condicionados al aditivo que se encuentre en exceso

$$F_{A,RH} = \frac{F(\rho_C - \rho_e)}{\rho_{A,RH}} \quad (6)$$

Con el modelo ya planteado, solo falta identificar cuantitativamente los parámetros utilizados. El valor de estos se encuentra en la Tabla 32.

Tabla 32: Valor de los parámetros utilizados en el balance de cargas.

Simbología	Valor
V_C	8 [m ³]
ρ_C	243 [$\mu eq/l$]
F_e	96000[l/h]
F_s	96000[l/h]
ρ_e	[$\mu eq/l$]
F_{RH}	A determinar
F_A	A determinar
ρ_A	16[meq/l]
ρ_{RH}	800[meq/l]

A continuación, se explica de donde se obtuvieron los parámetros

Volumen estanque cabecera de máquina: Información entregada por la empresa.

Demanda aniónica estanque cabecera de máquina: Es el promedio de las medidas tomadas durante la sección 4.

Flujo de entrada y salida ($F_e = F_s = F$): Desafortunadamente, se desconoce el flujo que entra y sale del estanque de mezcla, por lo cual, se procede utilizar un volumen promedio de producción. Para esto se considera el flujo másico de producción de papel,

el que alcanza los 4000 [kg papel/h], este flujo pasa a través del estanque de mezcla a una consistencia baja, cercana al 4%, es decir, los 4000 [kg papel/h] atraviesan el sistema en una suspensión acuosa de 100.000 [l/h], de los cuales, 96.000 [l/h] corresponden a agua.

Demanda aniónica almidón: El almidón corresponde a una solución acuosa al 4% en peso volumen de almidón sólido. A su vez, este polímero tiene una densidad de carga promedio de 0,4 [meq/g], por consiguiente, la densidad de la solución llega a los 16 [meq/l]. Esta solución también fue medida en el Mutek y entrego un valor levemente mayor, cercano a los 22 [meq/l]. Considerando que este es un dato empírico, es el valor que será utilizado en el cálculo.

Demanda aniónica Cartabond: El Cartabond es una resina de poliamidoamina-epichloridrina a una concentración de 20% en sólidos. Este polímero tiene una densidad promedio de 2 [meq/g] (depende del pH de la solución), por lo tanto, la densidad de carga de la solución alcanza los 800[meq/l]. No fue posible comparar este dato con información empírica ya que el Mutek no es capaz de cuantificar tales niveles de demanda.

Antes de reemplazar los parámetros, se debe considerar que se desconoce qué agente de resistencia se está sobredosificando, por lo cual se procede a suponer tres casos.

Caso 1: El Cartabond es el flujo sobredosificado, al encontrarse en mayor proporción, reacciona rápidamente con la fibra, impidiendo que el almidón se fije en esta, dejándolo así, remanente en la suspensión.

$$F_{RH} = \frac{F \left[\frac{\text{ton}}{\text{h}} \right] \cdot 240 \left[\frac{\mu\text{eq}}{\text{l}} \right]}{\rho_{RH}} = \frac{96.000 \left[\frac{\text{ton}}{\text{h}} \right] \cdot 240 \left[\frac{\mu\text{eq}}{\text{l}} \right]}{800.000 \left[\frac{\mu\text{eq}}{\text{l}} \right]} = 28,8 \left[\frac{\text{l}}{\text{h}} \right]$$

Caso 2: El Almidón es el flujo sobredosificado e impide que el almidón se fije a la fibra, dejándolo así remanente en la suspensión

$$F_A = \frac{F \left[\frac{\text{ton}}{\text{h}} \right] \cdot 240 \left[\frac{\mu\text{eq}}{\text{l}} \right]}{\rho_{A,RH}} = \frac{96.000 \left[\frac{\text{ton}}{\text{h}} \right] \cdot 240 \left[\frac{\mu\text{eq}}{\text{l}} \right]}{22.000 \left[\frac{\mu\text{eq}}{\text{l}} \right]} = 1.050 \left[\frac{\text{l}}{\text{h}} \right]$$

Caso 3: Ambos aditivos se encuentran parcialmente sobredosificados.

$$F_A \cdot \rho_A + F_{RH} \cdot \rho_{RH} = F_A \cdot 16.000 \left[\frac{\mu\text{eq}}{\text{l}} \right] + F_{RH} \cdot 800.000 \left[\frac{\mu\text{eq}}{\text{l}} \right] = 240 \left[\frac{\mu\text{eq}}{\text{l}} \right]$$

$$F_A \cdot 16.000 \left[\frac{\mu eq}{l} \right] = F_{RH} \cdot 800.000 \left[\frac{\mu eq}{l} \right]$$

Finalmente,

$$F_A = 525 \left[\frac{l}{h} \right] \text{ y } F_{RH} = 14,4$$

Tabla 33: Estimación de la sobredosificación de agentes de resistencia

	Almidón [%]	Cartabond [%]	Sobredosificación Almidón [l/h]	Sobredosificación Cartabond [l/h]
Caso 1	100	0	0	28,8
Caso 2	0	100	0	1440
Caso 3	50	50	500	10

Tabla 34: Dosificación promedio utilizada en fabricación de Sabanilla 5 y 6 de diciembre 2016

Aditivo	Dosificación [l/h]
Almidón	1800
Agente de resistencia en húmedo (RH)	140

El primer caso, propone una disminución del 55% de la dosificación de almidón, dejando un consumo específico de 5,5 [kg/ton], situándose dentro de los estándares de producción de 5 – 8 [kg/ton]. Por otra parte, el caso 2 propone una disminución del 20% de la dosificación de Cartabond, dejando un específico de 25,6 [kg/ton] lo cual, nuevamente, se encuentra dentro de los rangos esperados.

Anexo E: Planilla Excel consumo específicos.

En la Figura 35 se visualiza la planilla Excel con la cual los operadores calculan los consumos específicos de almidón y Cartabond al inicio y fin de cada turno. Se puede observar que el ejemplo de cálculo es el mismo desarrollado en el Anexo B.

Consumo específicos de Almidón y RH	
Variable	Valores
Velocidad del pope [m/min]	930
gramaje del papel [gr]	38
Flujo de Almidón [lt/hr]	960
Flujo de RH [lt/hr]	152
Grados Brix	4
Específicos de Almidón [kg/ton papel]	6,6
Específicos de RH [kg/ton papel]	27,3
Flujo de RH [lt/hr]	
tiempo 2 litro [segundos]	57,6

Figura 35: Planilla de cálculo consumos específicos de agentes de resistencia.

Anexo F: Planilla de Control

A continuación, en la Figura 36, se presenta la planilla de control utilizada.

Fecha	Turno Noche		Turno Día		Turno Tarde	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
11-02-2017						
Fabricación	762-R2	762-R2	762-R2	762-R2	762-R2	762-R2
Específicos de Almidón[kg/ton]	7,32	7,32	7,16	8,95	7,56	7,80
Específicos de RH [kg/ton]	23,82	18,41	19,93	19,93	12,40	17,31

50ms/ton
02:00 55 BAJA RH 102 valor Alto
762 22 kg/ton *ultimo fabricacion Promestion*

Fecha	Turno Noche		Turno Día		Turno Tarde	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
12-02-2017						
Fabricación	762-R2	762-R2	762-R2	762-R2	762-R2	762-R2
Específicos de Almidón[kg/ton]	9,55	9,55	9,59	9,46	7,49	7,84
Específicos de RH [kg/ton]	20,33	18,45	18,50	18,32	27,69	30,26

55 BAJA por valor Alto. Tarde

Fecha	Turno Noche		Turno Día		Turno Noche	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
13-02-2017						
Fabricación	762-R2	762-R2	762-R2	762-R2	762-R2	762-R2
Específicos de Almidón[kg/ton]	9,07	9,07	9,80	8,91	9,36	9,36
Específicos de RH [kg/ton]	23,52	16,07	9,14	10,3	18,76	18,55

Figura 36: Planilla de control implementada

Anexo G: Impacto y proyección económica

En esta sección se cuantifica el impacto económico consecuencia del proceso de optimización de agentes de resistencia. Para esto, se considera que la producción anual de CMPC Tissue planta Puente Alto se mantiene constante e idéntica al año 2016. Este supuesto es coherente con la situación actual de producción de la planta. En la Tabla 35 se encuentra la producción total y el detalle que corresponde a servilletas y toallas intervenidas.

Tabla 35: Producción proyectada anual 2016-2017

Papel	Producción [ton/año]	Porcentaje
Toalla 1	2.156	4%
Servilleta 1R	1.657	3%
Servilleta 1T	2.867	5%
Toalla 3	2.878	5%
Sabanilla	1.000	2%
Producción 2016	55.654	100%

La fórmula general para estimar el impacto económico de un producto ($IC_{producto}$) considera su producción anual (P_{anual}), el precio del aditivo en cuestión

($P_{almidón}$ y $P_{Cartabond}$) y el efecto cuantitativo de la optimización ($E_{optimización}$). La fórmula general está dada por la ecuación

$$IC_{producto} = E_{optimización} \cdot P_{anual} \cdot P_{almidón, Cartabond} \quad (7)$$

El valor de $E_{optimización}$ es obtenido desde las Tabla 19 y Tabla 20 y el precio de cada aditivo corresponde a $P_{almidón} = 0,5$ [US\$/kg] y $P_{Cartabond} = 0,77$ [US\$/kg]. Con estos datos se procede a calcular el ahorro de cada producto.

$$IC_{toalla 1} = 9 \left[\frac{kg \text{ Cartabond}}{ton \text{ papel}} \right] \cdot 2.156 \left[\frac{ton \text{ papel}}{año} \right] \cdot 0,74 \left[\frac{US\$}{kg \text{ Cartabond}} \right] = US\$14360$$

$$IC_{Servilleta 1R} = 1,9 \left[\frac{kg \text{ Cartabond}}{ton \text{ papel}} \right] \cdot 1.657 \left[\frac{ton \text{ papel}}{año} \right] \cdot 0,74 \left[\frac{US\$}{kg \text{ Cartabond}} \right] \\ = US\$2.330$$

$$IC_{Servilleta 1T} = 6,4 \left[\frac{kg \text{ Cartabond}}{ton \text{ papel}} \right] \cdot 2.867 \left[\frac{ton \text{ papel}}{año} \right] \cdot 0,74 \left[\frac{US\$}{kg \text{ Cartabond}} \right] \\ = US\$13.578$$

$$IC_{sabanilla} = 2,2 \left[\frac{kg \text{ Cartabond}}{ton \text{ papel}} \right] \cdot 1.000 \left[\frac{ton \text{ papel}}{año} \right] \cdot 0,74 \left[\frac{US\$}{kg \text{ Cartabond}} \right] = US\$1.628$$

$$IC_{Almidón} = 55.654 \left[\frac{ton \text{ papel}}{año} \right] \cdot 2,8 \left[\frac{kg \text{ almidón}}{ton \text{ papel}} \right] \cdot 0,5 \left[\frac{US\$}{kg \text{ almidón}} \right] = US\$77.915$$

Como se puede observar, el ahorro total de productos intervenidos con éxitos alcanza los US\$110000. De este valor, un 71% corresponde a la optimización de almidón y un 29% corresponde a una disminución en el consumo de Cartabond.

Anexo H: Análisis técnico económico de las propuestas de mejora.

Como se mencionó en la sección 4, se propone utilizar agentes captadores de basura aniónica en el estanque de mezcla de la toalla 1 y 2 de forma de evitar la pérdida de agentes de resistencia en el estanque de cabecera de máquina. A continuación, se procede a evaluar técnica y económicamente esta propuesta.

De igual manera a los desarrollado para la Sabanilla, la dosis estimada de agente removedor de basura aniónica es calculada por medio de un balance de cargas, la cantidad a dosificar debe ser capaz de disminuir la demanda catiónica del sistema, evitando pérdidas de agentes de resistencia. El volumen de control considerado para el balance es el mostrado en la Figura 37.

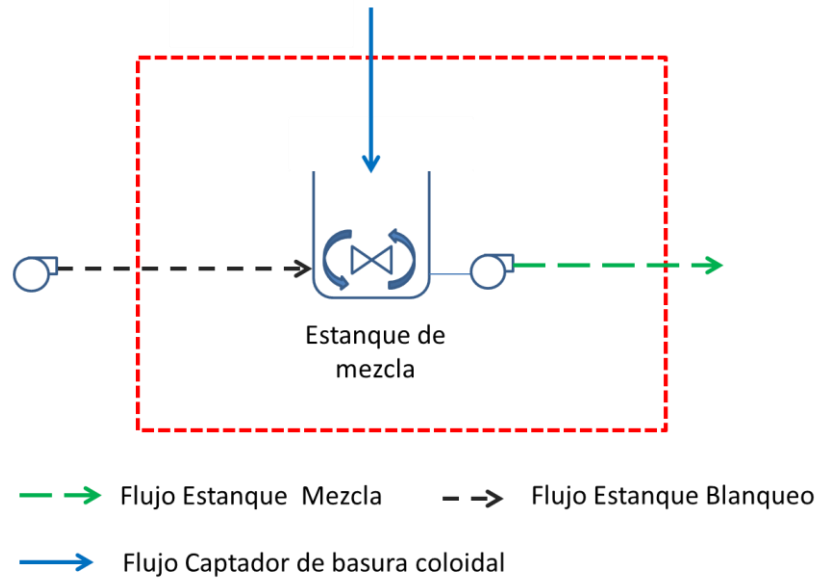


Figura 37: Volumen de control considerado para el balance de carga.

Antes de plantear el modelo, es necesario definir los parámetros a utilizar. En la Tabla 36 se presentan éstos, con sus respectivas unidades y simbología.

Tabla 36: Parámetros utilizados en el balance de cargas

Simbología	Parámetro	Unidad
V_M	Volumen del estanque de mezcla	$[m^3]$
ρ_M	Demanda catiónica del estanque de mezcla	$[\mu eq/l]$
F_B	Flujo que entra al estanque de mezcla, proveniente del estanque de blanqueo.	$[l/h]$
ρ_B	Demanda catiónica del estanque de blanqueo.	$[\mu eq/l]$
F_C	Flujo del captador de basura coloidal.	$[l/h]$
F_A	Flujo Almidón.	$[l/h]$
F_{RH}	Flujo agente de resistencia en húmedo.	$[l/h]$
ρ_C	Demanda catiónica captador de basura coloidal.	$[\mu eq/l]$
F_M	Flujo de salida del estanque de Mezcla.	$[l/h]$
ρ_A	Demanda catiónica almidón.	$[\mu eq/l]$
ρ_{RH}	Demanda catiónica agente de retención en húmedo.	$[\mu eq/l]$

El balance de carga efectuado en el volumen de control de la Figura 37 queda determinado por la ecuación 8.

$$\frac{dV_M \cdot \rho_M}{dt} = F_B \cdot \rho_B - F_M \cdot \rho_M + F_C \cdot \rho_C \quad (8)$$

Para resolver la ecuación 8, se deben tomar 2 supuestos; el primero, es considerar el sistema en estado estacionario, por lo cual, el volumen y la demanda de carga del estanque de mezcla se mantiene constante en el tiempo. Por otra parte, el segundo supuesto considera que el flujo de dosificación del agente captador es despreciable comparado con los flujos de entrada y salida del estanque de mezcla ($F_B, F_M \gg F_C$). Ambos supuestos son coherentes, el primero radica en la poca variación de nivel observada durante la toma de datos y el segunda queda en evidencia al notar que el aditivo de mayor suministro no supera el 3% del flujo de pasta. Finalmente, el balance de carga queda dado por la ecuación 9.

$$F_C = \frac{F \cdot (\rho_B - \rho_M)}{\rho_C} \quad (9)$$

A continuación, se procede a estimar el valor de cada parámetro:

Flujo(F): De los parámetros involucrados, falta determinar el flujo de pasta que atraviesa el sistema, sin embargo, se desconoce el flujo que entra y sale del estanque de mezcla, por lo cual, se procede utilizar un volumen promedio de producción, para esto se considera el flujo másico de ambos papeles. En los dos casos, el volumen promedio de producción alcanza los 2500 [kg papel/h], este flujo pasa a través del estanque de mezcla a una consistencia baja, cercana al 4%, es decir, los 2500 [kg papel/h] atraviesan el sistema en una suspensión acuosa de 62.500 [l/h], de los cuales, 60.000 [l/h] corresponden a agua.

Demanda catiónica a neutraliza ($\rho_B - \rho_M$): La diferencia en la densidad de carga, expresada como ($\rho_B - \rho_M$), está dada por la cantidad de basura aniónica que se requiera neutralizar y corresponde a la diferencia de demanda catiónica del estanque cabecera de máquina y el estanque de mezcla. En el caso de la toalla natural institucional y el papel ecológico, corresponden a 90 [$\mu\text{eq/l}$] y 34 [$\mu\text{eq/l}$] respectivamente.

Demanda aniónica captador de basura aniónica (ρ_c): El captador de basura coloidal corresponde a una Polydamac al 40% de sólidos, este aditivo fue ofrecido por *SLK Chemicals*. Ahora bien, considerando que la demanda catiónica de este polímero es de aproximadamente $6 [meq/g]$ se puede estimar que su demanda de carga es de aproximadamente $2.400 [meq/l]$. Con los parámetros ya calculados, se procede a determinar los flujos necesarios para cada papel.

$$F_C = \frac{F \cdot (\rho_B - \rho_M)}{\rho_c} = \frac{60.000 \left[\frac{l}{h} \right] \cdot 90 \left[\frac{\mu eq}{l} \right]}{2.400.000 \left[\frac{\mu eq}{l} \right]} = 2,2 \left[\frac{l}{h} \right]$$

$$F_C = \frac{F \cdot (\rho_B - \rho_M)}{\rho_c} = \frac{60.000 \left[\frac{l}{h} \right] \cdot 34 \left[\frac{\mu eq}{l} \right]}{2.400.000 \left[\frac{\mu eq}{l} \right]} = 0,8 \left[\frac{l}{h} \right]$$

Finalmente, el flujo de captador de basura coloidal a dosificar corresponde a $2,2 [l/h]$ para la toalla 1 y de $0,8 [l/h]$ para la toalla 2. Ambos valores corresponden a flujos técnicamente posibles, y similares a las dosis recomendadas por el proveedor. [34]

Con los flujos ya estimados, se procede a evaluar económicamente la propuesta. Para esto se debe considerar el ahorro en agentes de resistencia se obtiene con la adición de este nuevo producto. Para cuantificar éste, se debe calcular la cantidad que es pérdida durante la neutralización de basura aniónica

Nuevamente se desconoce qué proporción de almidón y Cartabond neutraliza la basura aniónica, por lo cual se procede a evaluar dos escenarios posibles; en el primero, la basura aniónica es neutralizada solo por almidón, permitiendo que todo el Cartabond se absorbido por la fibra, por el contrario, el segundo caso considera que solo el Cartabond neutraliza la basura aniónica, permitiendo al almidón fijarse completamente en la fibra. Si la propuesta de uso de removedor de basura aniónica es económicamente superior a ambos casos, lo será para cualquier combinación de Cartabond y Almidón posible.

A partir de esto, se determina que el flujo de almidón neutralizado por basura catiónica corresponde a $245 [l/h]$ para la toalla 1 y $93 [l/h]$ para la toalla 2. Esto corresponde, respectivamente, a un 37% y un 15% de la dosis total de almidón añadida, por ende, este resultado es coherente con la realidad de la planta.

$$F_A = \frac{F \cdot (\rho_B - \rho_M)}{\rho_A} = \frac{60.000 \left[\frac{l}{h} \right] \cdot 90 \left[\frac{\mu eq}{l} \right]}{22.000 \left[\frac{\mu eq}{l} \right]} = 245 \left[\frac{l}{h} \right]$$

$$F_A = \frac{F \cdot (\rho_B - \rho_M)}{\rho_A} = \frac{60.000 \left[\frac{l}{h} \right] \cdot 34 \left[\frac{\mu eq}{l} \right]}{22.000 \left[\frac{\mu eq}{l} \right]} = 93 \left[\frac{l}{h} \right]$$

De la misma forma que para el almidón, se calculan los flujos de agentes de resistencia que cumplen con la neutralización de carga. Este polímero tiene una densidad promedio que se estima 800 [meq/l].

$$F_{RH} = \frac{F \cdot (\rho_B - \rho_M)}{\rho_C} = \frac{60.000 \left[\frac{l}{h} \right] \cdot 90 \left[\frac{\mu eq}{l} \right]}{800.000 \left[\frac{\mu eq}{l} \right]} = 6,8 \left[\frac{l}{h} \right]$$

$$F_{RH} = \frac{F \cdot (\rho_B - \rho_M)}{\rho_C} = \frac{60.000 \left[\frac{l}{h} \right] \cdot 34 \left[\frac{\mu eq}{l} \right]}{800.000 \left[\frac{\mu eq}{l} \right]} = 2,6 \left[\frac{l}{h} \right]$$

Todos los flujos estimados, corresponden a valores posibles.

Por último, se debe determinar el costo de operación por hora y determinar si la alternativa es atractiva económicamente o no. Para esto se considera el precio de los productos presente en la Tabla 37. El valor comercial fue llevado a dólares por litro de solución.

Tabla 37: Precio unitario aditivos químicos

Aditivo	Precio [US\$/l]
Almidón	0,03
Cartabond	0,77
Captador de basura aniónica	2,5

Finalmente, en la Tabla 38 se puede observar el ahorro esperado por hora de operación y el ahorro anual. Este último considera las horas de producción de cada papel al año.

Tabla 38: Ahorro anual adquisición de un agente removedor de basura aniónica

	Papel	Disminución del consumo de aditivo [US\$/h]	Gasto [US\$/l]	Ahorro [US\$/h]	Ahorro anual [US\$]
Caso 1	Toalla 1	7,4	5,5	1,1	870
	Toalla 2	2,8	2	0,5	435
Caso 2	Toalla 1	5,2	5,5	-0,5	84
	Toalla 2	2	2	-0,2	34

Como se puede observar, en el mejor de los casos se tiene un ahorro estimado de US\$1.305, lo cual no es atractivo para la empresa.