



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



IDENTIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE PARÁMETROS OPERACIONALES QUE DETERMINAN EL CONSUMO DE ASA EN FPC PAPELES

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

RODOLFO ERNESTO LEÓN TRONCOSO

Profesor Tutor: Mabel Ivonne Vega Coloma.

Ingeniero Supervisor: Pedro Antonio Gallardo Rebolledo.

Concepción, 1 de agosto de 2019.

RESUMEN

El control de los parámetros operacionales en una planta de procesos es vital para el aseguramiento de la producción conforme a los estándares de calidad comprometidos. En particular, en plantas que producen papeles y cartones esta problemática es compleja dado las diferentes interacciones que se producen a nivel químico. El correcto y oportuno control de los parámetros de operación en plantas productoras de papel permite que los consumos de ciertos aditivos estén dentro de los rangos aceptables de variabilidad, y en su defecto permite, la identificación temprana de desviaciones.

Por lo anterior, este trabajo aborda el análisis histórico de variables de procesos que permitan identificar factores que estén influyendo en el consumo de aditivos críticos en la producción de papel. Este proyecto se realizó en convenio con la empresa Forestal y Papelera Concepción S.A., que se dedica a la fabricación y comercialización de bobinas de papel para corrugar basado completamente en papel reciclado. El trabajo se basó en un análisis histórico de variables de procesos en la fabricación de papel onda encolado de los gramajes 120, 145 y 180 g/m². Se analizaron variables tales como: consumos específicos de aditivos químicos, demanda catiónica del proceso, retención de primer paso, entre otras. Esto en el contexto de buscar una causa para explicar el aumento en los consumos específicos de anhídrido alquenil succínico, o mejor conocido por sus siglas en inglés, como ASA, el cual es un agente de encolado interno utilizado en la fabricación de papel para dar la propiedad de resistencia a la penetración de líquidos en la estructura interna de la hoja de papel. Desde el mes de agosto del 2018 al presente, se comenzaron a registrar consumos mayores al valor promedio para cumplir con la prueba de calidad Cobb 120. Lo anterior puede ser producto de diferentes variables tales como una baja retención de finos, y/o baja demandas catiónicas del proceso. De esta manera, el objetivo general del trabajo es identificar parámetros de proceso que determinen el uso de ASA en la producción de FPC Papeles y proponer alternativas de mejora.

La metodología usada para la realización del trabajo se basó en la utilización del Software Microsoft Office 365 Business, a través de la herramienta Excel. Se realizó una revisión preliminar de planillas datos históricos de producción, seguido de una recopilación, selección y clasificación de los registros de consumo de químicos, producción, parámetros de calidad del papel, y parámetros de laboratorio de pasta. Posteriormente se realizó el tratamiento de datos de las variables seleccionadas para el análisis, a través de la eliminación de puntos atípicos y errores de traspaso de información en las planillas. Finalmente, se llevó a cabo un análisis de los datos históricos mediante tablas y gráficos dinámicos de Excel.

Como resultados relevantes, se obtuvo que existe una relación entre los consumos específicos de agentes de retención y drenaje, como lo son el Percol 3035 (floculante de poliacrilamida catiónica) y Xelorex RS1100 (coagulante de polivinilamina catiónica) con el sobreconsumo de ASA. Lo anterior se relaciona con la retención de los finos de fibras celulósicas, los cuales reaccionan con las moléculas de ASA debido a su carga aniónica y gran área superficial. Estos debido a su ínfimo tamaño, suelen ser filtrados en el proceso de drenaje quedando disueltos en las aguas bajo tela de la máquina papelera arrastrando consigo moléculas de ASA. Sin embargo, el sobreconsumo de ASA no se debe sólo a la retención y drenaje de finos, ya que se observó que las tendencias al alza de los consumos específicos de ASA, coinciden durante el mismo periodo con la tendencia a la baja en los valores de demanda catiónica en diferentes puntos de muestreo a lo largo del proceso. Esta tendencia de los valores de demanda catiónica se debió a la implementación de un circuito cerrados de aguas blancas, en las que se recirculaban las aguas provenientes del bajo tela que contenían moléculas de ASA y Xelorex, generándose una saturación de componentes catiónicos en la suspensión de fibras, originando como consecuencia un encolado menos efectivo. Finalmente, como solución se propuso disminuir los consumos del agente de drenaje Xelorex, con el fin de trabajar con demandas catiónicas de agua bajo tela cercanas a $-100 \mu\text{eq/L}$, además del uso de agentes de fijación de *stickies* y *pitch*, como también la mejora de la retención de finos, para lograr estabilizar la demanda catiónica del proceso.

Como conclusión del trabajo se obtuvo que la demanda catiónica es el principal parámetro de proceso que determina el consumo de ASA en la producción de FPC Papeles, debido a la recirculación de aguas blancas con contenido de restos de aditivos catiónicos tales como el mismo ASA y el Xelorex, lo que como consecuencia conllevó a un descenso en los valores de demanda catiónica a lo largo del proceso, provocando un aumento en sus consumos específicos para obtener un óptimo encolado. También se identificaron otros parámetros como la retención y el drenaje, los cuales determinan el uso de ASA como producto de la alta reactividad de las moléculas de encolante con los finos presentes en la suspensión de fibras generada durante el proceso.

AGRADECIMIENTOS

A MABEL VEGA, Ingeniera Civil Química Académica del Departamento de Ingeniería en Madera de la Universidad del Bío Bío, por su desempeño como Profesora Guía, durante el desarrollo de la Habilitación Profesional.

A PEDRO GALLARDO, Ingeniero de Procesos de FPC Papeles, por ejercer el cargo de Ingeniero Supervisor a lo largo de la Habilitación Profesional.

A MAURICIO SILVA, Gerente de Planta de FPC Papeles, por acogerme como alumno memorista en el sector de máquina papelera de FPC Papeles.

A PABLO GÓMEZ, Ingeniero Químico Asesor de FPC Papeles, DENNIS CLEMO, Bioquímico de SOLENIS, y MAURICIO ZÁRATE, Ingeniero Civil Químico de MANOLI, por su colaboración y entrega de consejos durante la Habilitación Profesional.

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN	i
AGRADECIMIENTOS.....	iv
TABLA DE CONTENIDOS	v
NOMENCLATURA	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABLAS	xi
GLOSARIO	xii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 Proceso de producción de papel reciclado.....	4
3.1.1 Materias primas.....	5
3.1.2 Recepción y almacenamiento de las materias primas	6
3.1.3 Preparación de pasta.....	6
3.1.4 Máquina Papelera.....	8
3.1.5 Bobinado y cortado	10
3.2 Control de calidad del papel	10
3.2.1 Laboratorio de pasta	11
3.2.2 Laboratorio de papel.....	11
3.3 Aditivos químicos / Química del extremo húmedo	12
3.3.1 Aditivos de resistencia en seco.....	12
3.3.2 Aditivos de control de retención y drenaje	13
3.3.3 Aditivos de encolado interno	15

3.3.4 Otros aditivos utilizados en la fabricación de papel.....	19
4. OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
4.1 Objetivo General.....	20
4.2 Objetivos Específicos.....	20
5. METODOLOGÍA	21
5.1 Recursos materiales y equipamiento.....	21
5.2 Procedimiento	22
5.2.1 Revisión preliminar de planillas de datos históricos de producción	22
5.2.2 Recopilación, selección y clasificación de datos.....	23
5.2.3 Tratamiento de datos de las variables seleccionadas.....	26
5.2.4 Análisis de los datos históricos por Tablas y Gráficos Dinámicos de Excel.....	27
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
6.1 Resultados y discusión del comportamiento en el tiempo de DCABT y consumos específicos de Basoplast y Xelorex RS1100 en papeles OE de 120, 145 y 180 g/m ²	30
6.2 Resultados y discusión del comportamiento en el tiempo de retención de primer paso (FPR) Top y Back y consumos específicos Percol 3035 en papeles OE de 120, 145 y 180 g/m ²	32
6.3 Resultados y discusión del comportamiento en el tiempo de demandas catiónicas en distintas etapas del proceso de producción de Papeles OE de 120, 145 y 180 g/m ²	35
6.4 Propuestas de mejora a la problemática.....	38
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	40
8. REFERENCIAS	41
ANEXOS	44
ANEXO I	44
ANEXO II	53

NOMENCLATURA

ABT: Agua Bajo Tela.

ABTB: Agua Bajo Tela *Back*.

ABTT: Agua Bajo Tela *Top*.

AKD: *Alkenyl Ketene Dimer*.

ASA: *Alkenyl Succinic Anhidride*.

CCT: *Corrugated Crush Test*.

CMT: *Corrugating Medium Test*.

DADMAC: Cloruro de
polidialildimetilamonio.

DCABT: Demanda Catiónica Agua Bajo
Tela.

DKL: *Double Kraft Liner*.

FPC: Forestal y Papelera Concepción.

FPR: *First-Pass Retention*.

MDC: Materia Disuelta y Coloidal.

OCC: *Old Corrugated Containers*.

OE: Óxido de etileno.

ONP: *Old Newsprint*.

PAM: Poliacrilamida.

PCC: Carbonato de calcio precipitado.

PEI: Polietilenimina.

PO: Óxido de polipropileno.

Producción PP: Producción Papel Pesado.

PVAm: Polivinilamina.

RCT: *Ring Crush Test*.

TMP: *Thermo Mechanical Pulp*.

UOP: *Unsorted Office Paper*.

WTL: *White Top Liner*.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. DIAGRAMA DE BLOQUES MACROESTRUCTURAL DEL PROCESO PRODUCTIVO DE FPC PAPELES.	4
FIGURA 2. DIAGRAMA DE BLOQUES MICROESTRUCTURAL DEL PROCESO PRODUCTIVO DE FPC PAPELES.	4
FIGURA 3. ORIENTACIÓN DE LAS MOLÉCULAS DEL AGENTE ENCOLANTE PARA LOGRAR EL ENCOLADO DEL PAPEL.	16
FIGURA 4. ESTRUCTURA MOLECULAR DE AKD (IZQUIERDA) Y ASA (DERECHA).	17
FIGURA 5. PASOS DEL PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE DATOS DE PARÁMETROS DE PROCESO DE LA PRODUCCIÓN DE FPC PAPELES.	22
FIGURA 6. COMPORTAMIENTO EN EL TIEMPO DE DCABT Y CONSUMOS ESPECÍFICOS DE BASOPLAST Y XELOREX RS 1100 EN LA PRODUCCIÓN DE PAPEL OE 120 G/M ²	30
FIGURA 7. COMPORTAMIENTO EN EL TIEMPO DE DCABT Y CONSUMOS ESPECÍFICOS DE BASOPLAST Y XELOREX RS 1100 EN LA PRODUCCIÓN DE PAPEL OE 145 G/M ²	30
FIGURA 8. COMPORTAMIENTO EN EL TIEMPO DE DCABT Y CONSUMOS ESPECÍFICOS DE BASOPLAST Y XELOREX RS1100 EN LA PRODUCCIÓN DE PAPEL OE 180 G/M ²	31
FIGURA 9. COMPORTAMIENTO EN EL TIEMPO DE VALORES DE RETENCIÓN DE PRIMER PASO (FPR) <i>TOP</i> Y <i>BACK</i> Y CONSUMOS ESPECÍFICOS PERCOL 3035 EN LA PRODUCCIÓN DE PAPEL OE 120 G/M ²	32
FIGURA 10. COMPORTAMIENTO EN EL TIEMPO DE VALORES DE RETENCIÓN DE PRIMER PASO (FPR) <i>TOP</i> Y <i>BACK</i> Y CONSUMOS ESPECÍFICOS PERCOL 3035 EN LA PRODUCCIÓN DE PAPEL OE 145 G/M ²	33
FIGURA 11. COMPORTAMIENTO EN EL TIEMPO DE VALORES DE RETENCIÓN DE PRIMER PASO (FPR) <i>TOP</i> Y <i>BACK</i> Y CONSUMOS ESPECÍFICOS PERCOL 3035 EN LA PRODUCCIÓN DE PAPEL OE 180 G/M ²	33
FIGURA 12. COMPORTAMIENTO EN EL TIEMPO DE DEMANDAS CATIONICAS EN DISTINTAS ETAPAS DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE PAPEL OE 120 G/M ²	35
FIGURA 13. COMPORTAMIENTO EN EL TIEMPO DE DEMANDAS CATIONICAS EN DISTINTAS ETAPAS DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE PAPEL OE 145 G/M ²	36

FIGURA 14. COMPORTAMIENTO EN EL TIEMPO DE DEMANDAS CATIONICAS EN DISTINTAS ETAPAS DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE PAPEL OE 180 G/M ² .	36
FIGURA 15. DIAGRAMA DE DECISIONES PARA MANTENER ESTABLE LAS DCABT EN EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE FPC PAPELES.	39
FIGURA A1. PULPER PRIMARIO 15E200 EN OPERACIÓN FPC PAPELES.	44
FIGURA A2. RAGGER 15E204 EN OPERACIÓN FPC PAPELES.	45
FIGURA A3. TAMBOR DE RECHAZOS (15E202) FPC PAPELES.	46
FIGURA A4. LIMPIADORES CENTRÍFUGOS O <i>CLEANERS</i> (15E205 Y 15E206) FPC PAPELES.	46
FIGURA A5. DEPURADOR GRUESO PRIMARIO (15E207), DEPURADOR GRUESO SECUNDARIO (15E209) Y DEPURADORES FINOS (15E56, 15E57 Y 15E73) FPC PAPELES.	47
FIGURA A6. ESPESADORES DE FIBRA CORTA Y FIBRA LARGA FPC PAPELES.	48
FIGURA A7. REFINADORES DE FIBRA FPC PAPELES.	49
FIGURA A8. PRENSA DE DOBLE TELA (15E125) FPC PAPELES.	49
FIGURA A9. MESAS FORMADORAS FOURDRINIER DE LÍNEAS BACK Y TOP DE MÁQUINA PAPELERA FPC PAPELES.	50
FIGURA A10. BOBINADORA INDIVIDUAL FPC PAPELES.	53
FIGURA A11. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE FPC PAPELES LÍNEA TOP.	53
FIGURA A12. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE FPC PAPELES LÍNEA BACK.	54
FIGURA A13. ESTRUCTURA QUÍMICA DE COAGULANTES DE POLIVINILAMINAS. XELOREX RS1100, 1200 Y 1300.	55
FIGURA A14. ESTRUCTURA QUÍMICA DE FLOCULANTES DE POLIACRILAMIDA (PAM) ANIÓNICA Y CATIONICA. PRODUCTOS PERCOL 3035, PERCOL 63, ETC.	55
FIGURA A15. REPRESENTACIÓN DE MECANISMO PUENTE DE PERCOL 3035.	56
FIGURA A16. REPRESENTACIÓN DE MECANISMO PARCHE DE XELOREX RS1100.	56
FIGURA A17. DIAGRAMA DE EFECTOS ENTREGADOS EN LA PRODUCCIÓN DE PAPEL SEGÚN DOSIFICACIÓN DE COAGULANTE.	57
FIGURA A18. REACCIÓN DE ASA CON AGUA, FORMACIÓN DE ÁCIDO DICARBOXÍLICO (ÁCIDO ALQUENIL SUCCÍNICO) Y FORMACIÓN DE SAL.	58
FIGURA A19. REPRESENTACIÓN INTERACCIÓN MOLÉCULA DE ASA CON ALMIDÓN CATIONICO.	59

FIGURA A20. COMPORTAMIENTO EN EL TIEMPO DEL % RESTANTE DE ASA NO HIDROLIZADO EN FUNCIÓN DEL PH DE LA EMULSIÓN.	60
FIGURA A21. COMPORTAMIENTO DE LOS VALORES DE LA PRUEBA COBB RESPECTO A LA DOSIFICACIÓN DE SULFATO DE ALUMINIO EN EL SISTEMA.....	61
FIGURA A22. COMPORTAMIENTO EN EL TIEMPO DEL % RESTANTE DE ASA NO HIDROLIZADO EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA DE LA EMULSIÓN.	61
FIGURA A23. REPRESENTACIÓN DE AGENTE DE FIJACIÓN Y CONTAMINANTES (BASURA ANIÓNICA).	62
FIGURA A24. REPRESENTACIÓN DE COMPLEJO DE BENTONITA CARGADO.	63
FIGURA A25. REPRESENTACIÓN DE FIJACIÓN DE COMPLEJO POLIELECTROLITO DE BENTONITA A LA FIBRA.....	63

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS DEL ENCOLADO SEGÚN SU TIPO.	15
TABLA 2. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE AGENTES DE ENCOLADO NEUTRO-ALCALINO.	18
TABLA 3. DESCRIPCIÓN DE OTROS ADITIVOS QUÍMICOS UTILIZADOS EN LA FABRICACIÓN DE PAPEL.	19
TABLA 4. SELECCIÓN DE VARIABLES A ANALIZAR POR SECCIÓN.	24
TABLA 5. LISTA DE TIPO DE PAPEL Y GRAMAJES ANALIZADOS.	24
TABLA 6. RESUMEN DESCRIPCIÓN CÁLCULO DE VALORES DIARIOS DE VARIABLES SELECCIONADAS.	25
TABLA 7. RANGOS PARA ELIMINACIÓN DE VALORES ATÍPICOS DE LABORATORIO DE CALIDAD Y PASTA.	26
TABLA 8. VARIABLES SELECCIONADAS PARA LOS ANÁLISIS GRÁFICOS POR PAPEL Y GRAMAJE.....	28
TABLA A1. ÁREA SUPERFICIAL RELATIVA DE FIBRAS Y FRAGMENTOS DE FIBRA.	54

GLOSARIO

Anfipático/a o Anfifílico/a: Las moléculas anfifílicas son aquellas formadas por un grupo hidrofílico y otro hidrofóbico (Fernández, García, Aparicio, & Sánchez., 2009).

Cleaners: Equipos que cumplen la función de eliminar pequeños contaminantes pesados presentes en la pasta (arena, metales, vidrio, entre otros.) por aceleración centrífuga, generada por un flujo de entrada tangencial que provoca la formación de un vórtice en el interior del *cleaner*; las partículas pesadas se mueven hacia el exterior del vórtice y, finalmente, caen al fondo del limpiador con los rechazos, mientras que la pulpa acepta el movimiento hacia el centro del vórtice, donde se eliminan a una presión más baja (Biermann, 1996).

Coagulación: Se refiere al proceso de desestabilización de las partículas suspendidas de modo que se reduzcan las fuerzas de separación entre ellas (Gómez, 2005).

Consistencia: Corresponde a una medida del contenido de sólidos de la pasta de pulpa de papel. Se representa como el peso seco de las fibras y otros sólidos, dividido por el peso húmedo total de suspensión de fibras (Biermann, 1996). Se representa a través de la siguiente fórmula:

$$\text{Consistencia} = \frac{\text{peso del material seco}}{\text{peso de la suspensión}} \times 100 \% \quad \text{Ecuación. 1}$$

Contenido de humedad: Relación existente entre el peso del agua contenida en la muestra en estado natural y el peso de la muestra secada en un horno a una determinada temperatura (Leyton, 2017).

Demanda Catiónica: Es el parámetro más utilizado por los fabricantes de papel para la medida cuantitativa de los contaminantes que se encuentran en forma de materia disuelta y coloidal (MDC), que se define como los μeq de polímero catiónico necesarios para neutralizar las cargas aniónicas presentes en una suspensión (Monte, 2000). Es una medida cualitativa de la carga en un sistema, y una medida cuantitativa del número de cargas por unidad de volumen en un sistema (Clemo, 2018).

Encolante: Agente introducido en la elaboración de papel o bañado sobre el papel una vez elaborado con el fin de retardar la penetración del agua o de soluciones acuosas en la estructura del papel, evitando la excesiva penetración de tintas, permitiendo la adecuada impresión y escritura del papel (Abril & Mogollón, 2012).

Fijación: Se relaciona con la precipitación de la basura aniónica, por lo cual su mecanismo de acción se explica en detalle en el ANEXO II (Clemo, 2018).

Finos: En terminología papelera se le llama “finos” a los fragmentos de fibras (en el orden de las micras), que difieren en gran medida del tamaño medio de las fibras (longitudes en el orden de milímetros y espesores de micras) (Monte, 2000). En las pastas recicladas, al contenido de finos se suma la presencia de cargas (o rellenos), y la mayoría de los aditivos disueltos o coloidales presentes en el *furnish* (Sjóström & Holmbom, 1988). Los finos generalmente tienen cinco veces el área superficial de las fibras por unidad de peso dada, pero puede ser hasta 10 veces (ver Tabla A1 del ANEXO II) (Bajpai, 2018). La presencia de finos, así como de partículas de baja granulometría en el proceso afecta principalmente a la retención y al drenaje en la máquina de papel y, por tanto, a la calidad del producto final (Monte, 2000).

Floculación: Tiene relación con los fenómenos de transporte dentro del líquido para que las partículas hagan contacto. Esto implica la formación de puentes químicos entre partículas de modo que se forme una malla de coágulos. La aglomeración de las partículas coaguladas, forman flóculos más pesados, tal que su peso específico supere a la del agua y puedan sedimentar (Gómez, 2005).

Formación: Es una función de la longitud de las fibras, los medios de retención empleados y la turbulencia del flujo de la caja de entrada, y es controlada por el tamaño de los flóculos. Se da durante el paso del flujo de pasta por la tela de formación (Bajpai, 2018).

Freeness: Es un parámetro diseñado para dar una medida de la velocidad a la cual una suspensión diluida de pulpa (3 gramos de pulpa en 1 litro de agua) se puede drenar (TAPPI Press, 1999).

Furnish: Es la combinación de todos los materiales utilizados para hacer papel (Biermann, 1996).

Gramaje: El gramaje de un papel se define como el peso en gramos de un metro cuadrado de papel. Y su unidad de medida es g/m^2 (Carnero, 2014).

Hidrólisis: define la descomposición y reacción de los minerales con los iones H_3O y OH^- del agua (Núñez, 1981).

Pitch (o basura aniónica): Comprende a la totalidad de los extraíbles (resinas) y compuestos fenólicos de la madera, productos de degradación de lignina, productos químicos de pulpaje o blanqueo, o materiales que se transfieren de la fibra secundaria. Estos son materiales que contribuyen a la carga aniónica del stock pero que no son componentes agregados intencionalmente (Bajpai, 2018). Se considera un grave problema en las plantas de pulpa y papel debido a su tendencia a separarse de las fibras celulósicas al procesarse éstas y formar así depósitos, masas aceitosas o espumaduras las cuales interfieren con la operación de la máquina de papel, tuberías, bombas, depuradores, lavadoras, etc; y, además, por dispersarse en la pasta papelera formando manchas o huecos en el papel (Rivera, 2004).

Potencial Zeta: Representa una medida cuantitativa de la carga superficial de las partículas en suspensión (fibras y finos) y guarda una estrecha relación con la estabilidad coloidal de las suspensiones (Abril & Mogollón, 2012). Es el potencial medido a una pequeña distancia de la superficie de una partícula cargada (Clemo, 2018).

Pulper: Equipo que consiste en un tanque, que en cuyo fondo posee una hélice accionada por un rotor (Biermann, 1996).

Química coloidal: En la química de la fabricación de papel, el rango de tamaño de coloide es de 1 nm (polímeros solubles de muy bajo peso molecular) a 1 μm (mayoría de los rellenos y algunos finos de pulpa); los enlaces químicos débiles pueden mantener objetos dentro de este rango en soluciones. Casi todos los coloides tienen superficies cargadas de grupos funcionales aniónicos o catiónicos, pudiéndose unir a objetos más grandes, como las fibras; sin embargo, dos fibras no se mantendrán juntas por enlaces químicos débiles en suspensiones diluidas. La cantidad y el tipo de carga superficial son críticos para las propiedades de estabilidad y solubilidad de los coloides (Bajpai, 2018).

Ragger: Equipo que consiste en una cadena que se extrae lentamente durante un largo periodo de tiempo (probablemente 1 metro cada unas cuantas horas) (Biermann, 1996).

Stickies: Corresponden a depósitos adherentes en el proceso de fabricación de papel, formados a partir de contaminantes provenientes del papel de recuperación, especialmente de las materias incorporadas al papel durante su fabricación (resinas hidrofóbicas, encolantes, almidón, adhesivos de estuco y tinta de impresión), que se encuentran en forma de materia disuelta y coloidal (MDC) que no se pueden eliminar mediante los procesos mecánicos convencionales. Esta materia disuelta y coloidal, que en su mayoría tiene carácter aniónico, puede desestabilizarse por un cambio brusco de las condiciones del sistema (temperatura, pH, fuerzas de cizalle, carga superficial, adiciones químicas, fuerza iónica del medio, etc.) y producir su aglomeración, como consecuencia de fenómenos de coagulación y precipitación, generando los depósitos (Monte, 2000).

Stock: Mezcla de pulpa (o pasta), rellenos, otros materiales de fabricación de papel y agua (Biermann, 1996).

Turbidez: Se define como la reducción de la transparencia de un líquido causada por la presencia de partículas en suspensión (Acebo-González & Hernández-García, 2013).

1. INTRODUCCIÓN

Forestal y Papelera Concepción S.A. (FPC), es una destacada empresa del rubro papelerero la cual se dedica a la fabricación y comercialización de bobinas de papel para corrugar basado completamente en papel reciclado. Ésta se encuentra ubicada en el corazón forestal de Chile, la Región del Bío Bío, Provincia de Concepción, en el Parque Industrial Escuadrón II de la comuna de coronel.

FPC inició su producción a finales del año 1995 fabricando papel periódico, y otros papeles de impresión en base a pulpa termo mecánica (TMP). Debido a los altos costos de producción, principalmente al alto consumo de energía eléctrica en la producción de la pulpa (TMP), la empresa paraliza temporalmente sus procesos productivos durante el año 2007, y vuelve a iniciar su producción en el año 2009, cambiando su producción a la fabricación de papeles de embalaje a partir de fibras recicladas, esto gracias a un proyecto de transformación de la Fábrica de Pulpa y Máquina Papelera desarrollado durante el año 2008. Dentro de los productos que ofrece FPC Papeles se encuentran: Papel Onda para corrugar y Papel HPHF, ambos utilizados en la fabricación de cajas de cartón, Papel WTL que posee una cara blanca imprimible, también utilizado para la fabricación de cajas de cartón, y Papel *Gypsum* de alta resistencia desarrollado para la producción de planchas de yeso. FPC Papeles posee una capacidad productiva de 110.000 toneladas al año, lo equivale al 15% del aporte al mercado nacional de la industria papelerera en Chile.

Dentro del proceso de producción de FPC Papeles se identifican las etapas de recepción de materias primas, preparación de la pasta, máquina papelerera y finalmente bobinado. Para que el papel producido pueda ser vendido, este debe pasar por un control de calidad con el fin de cumplir con las especificaciones técnicas solicitadas por el cliente. Entre estas las medidas de ancho, diámetro y peso de las bobinas, gramaje del papel y propiedades mecánicas. Para el cumplimiento de estas especificaciones, es necesario agregar una serie de aditivos químicos que permiten mejorar las propiedades del papel. Sin embargo, es de gran importancia dosificar de manera adecuada las cantidades de aditivos químicos a añadir en el proceso, como también manejar las variables de proceso de tal manera que se pueda llegar a los valores de calidad del papel solicitados por el cliente,

sin realizar un gasto excesivo en el consumo de aditivos químicos y/o energía empleada en el proceso. En este contexto una de las propiedades buscada en la fabricación de papel para cajas de cartón es la resistencia a la permeabilidad al agua en la estructura interna del papel. Esta propiedad se puede lograr agregando agentes encolantes tales como el ASA (*Alkenyl Succinic Anhidride*). Sin embargo, la adición de este producto no siempre resulta ser positiva, debido a que, las interacciones químicas producidas con el resto de los aditivos químicos, o reacciones de descomposición de la mezcla en su preparación o almacenamiento da como resultado pérdidas del producto, lo que conlleva a mayor gasto económico para obtener valores de calidad aceptables en el papel. Cabe destacar, que dentro de la empresa no existen estudios que se enfoquen en las variables analizadas en esta investigación, y dado la confidencialidad dentro del rubro respecto a las dosificaciones de químicos a en la producción de papel a escala industrial, es difícil hallar literatura sobre como manipular estas dosificaciones o variables de proceso para mejorar las propiedades del papel como el encolado. Es por este motivo que el presente trabajo tiene como objetivo la identificación de parámetros de proceso que determinen el uso de ASA en la producción de FPC Papeles y proponer alternativas de mejora, de esta forma se aporta a la empresa en la búsqueda de una solución que permita reducir los costos de consumo de este tipo de aditivos y generar un antecedente del estudio de los parámetros de proceso que afectan en el encolado, para ayudar a la resolución de problemáticas respecto al encolado del papel, que surjan en el futuro en la producción de FPC Papeles.

A continuación, en la Sección 2 se puede comprender de mejor manera la problemática planteada, seguida de una revisión bibliográfica en la Sección 3, de manera de dar a conocer el proceso productivo de la empresa FPC Papeles, y la química asociada este. En la Sección 4 se encuentran los objetivos de la investigación, y a continuación en la Sección 5 se presenta la metodología utilizada para la ejecución del trabajo. Finalmente, en la Sección 6 se encuentran los resultados de la investigación y su discusión correspondiente, para terminar en la Sección 7 con las conclusiones y recomendaciones finales del trabajo.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el proceso productivo de FPC Papeles, se incluyen etapas en donde es necesario realizar pruebas de laboratorio, tanto a la pasta generada para la formación de papel, como al papel producido al final del proceso, con el fin de comprobar que los valores obtenidos cumplen los estándares de calidad solicitados por el cliente. Para lograr lo anterior, se agregan aditivos químicos en el proceso, tales como agentes para la retención y drenaje, resistencia y fijación, y encolados en masa para inhibir la penetración de líquidos en la estructura interna del papel, entre otros.

Dado el contexto anterior, desde septiembre del 2018 al presente, se ha identificado un alza en el consumo de ASA (*Alkenyl succinic anhidride*, utilizado para el encolado en masa) en comparación a años anteriores, para cumplir con los valores de calidad del papel de la prueba Cobb 120 (realizado según la norma TAPPI). Se estima que lo anterior puede ser producido por diferentes variables de proceso tales como: la baja retención, y/o la baja demanda catiónica de la suspensión de fibras.

Actualmente, se estima que el sobreconsumo de ASA representa un 50% de ASA adicional consumida por tonelada producida, en comparación al consumo previo a la aparición de la problemática. Este consumo adicional significa un aumento en el costo total de aditivos químicos del 15%. Este es un alto valor considerando que el 11% del total de los costos de producción corresponde a aditivos químicos. De no controlarse la situación, el costo adicional en la producción podría desencadenar en un recorte de presupuesto en otros activos de la empresa, con el fin de asegurar la operación. También, el no control de las posibles causas podría tener consecuencias en la producción respecto a interacciones en la química del extremo húmedo, perjudicando al rendimiento de otros aditivos y a la calidad del producto final.

Finalmente, para evitar lo anterior, se busca que, a partir de un análisis de datos históricos de producción de la empresa, se logre deducir alguna variable de proceso que pueda afectar en el sobreconsumo de ASA. Al identificar lo anterior se logrará mantener y/o aumentar la tasa de producción junto con la optimización de los costos, manteniendo los valores de calidad del papel.

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1 Proceso de producción de papel reciclado

El proceso de productivo de FPC Papeles a grandes rasgos se puede representar por los siguientes diagramas de bloques:

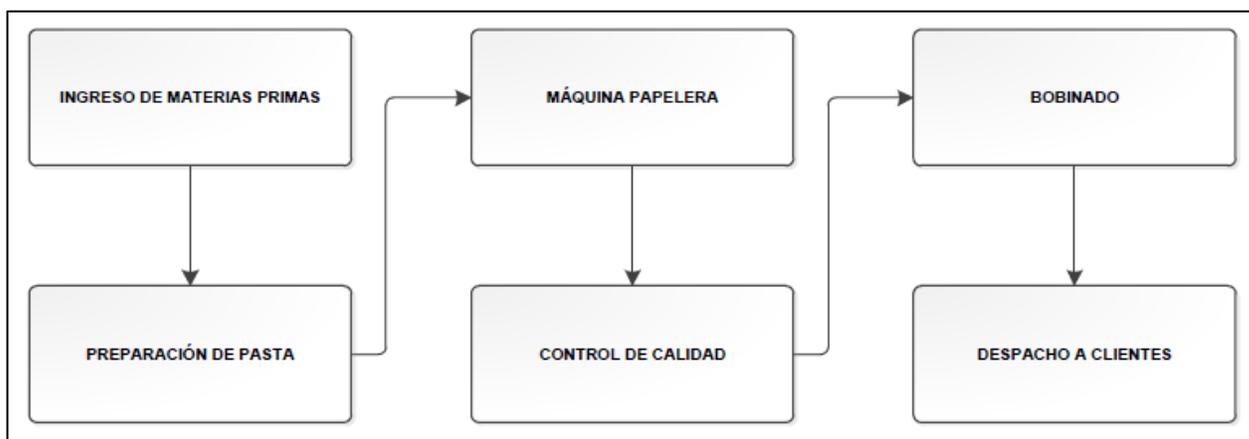


Figura 1. Diagrama de bloques macroestructural del proceso productivo de FPC Papeles.

Fuente: Elaboración propia.

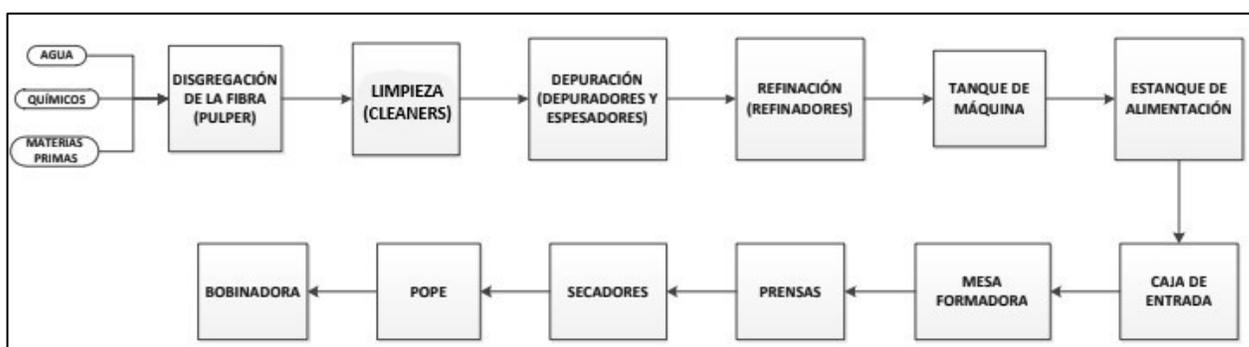


Figura 2. Diagrama de bloques microestructural del proceso productivo de FPC Papeles.

Fuente: Elaboración propia.

3.1.1 Materias primas

Las materias primas para la obtención de fibras destinadas a la fabricación de papel reciclado varían dependiendo de la calidad, la procedencia, tiempo y tipo de uso, estado, etc. Dentro de la clasificación de estas materias primas encontramos:

OCC (Old Corrugated Containers): Corresponde al cartón que ya ha salido al comercio, ya sea láminas o cajas utilizadas. Generalmente provienen de supermercados, ubicaciones comerciales y/o industriales, o de plantas de reciclaje ("Paper Stock Grades for Green Recycling", 2019).

DKL (New Double-Lined Kraft Corrugated Cuttings): Son los recortes generados en la producción de cajas de cartón que no han tenido uso después de su fabricación, estas provienen de plantas corrugadoras (CARTOPEL S.A.I., n.d.).

Papel Mezclado (Mixed Paper): Son compuestos de diferentes tipos y calidades de papel incluidos papeles de distintas fibras ("Paper Stock Grades for Green Recycling", 2019).

ONP (Old Newsprint): Corresponde al papel obtenido de los periódicos ya utilizados o nuevos. ("Paper Stock Grades for Green Recycling", 2019).

UOP (Unsorted Office Paper): Se refiere al papel de oficina que no ha sido clasificado para el reciclaje, por lo que puede contener hojas de papel no impreso, o papel impreso generado en oficina tales como documentos, informes, etc. ("Paper Stock Grades for Green Recycling", 2019).

Considerando lo anterior, FPC ocupa como principales materias primas papeles del tipo OCC, consumiendo aproximadamente 80.000 toneladas al año y del tipo DKL con 30.000 toneladas al año, y en menor medida papel mezclado, ONP o UOP sumando un total de 50.000 toneladas al año. FPC también utiliza como materia prima celulosa blanqueada obtenida de las principales plantas del país, para la fabricación de papeles especiales de cara blanca (FPC S.A., 2018).

3.1.2 Recepción y almacenamiento de las materias primas

El ingreso las materias primas se realiza a través de camiones en donde son transportadas en fardos y a granel, luego en cada recepción la materia prima es pesada y etiquetada para su identificación, según su clasificación (OCC, DKL, etc.), fecha de recepción, nombre del proveedor, procedencia, entre otras. Posteriormente se realiza la toma de muestra para el control de calidad en laboratorio, donde se verifica la humedad y calidad del cartón, y finalmente el material es almacenado según su tipo y procedencia para ser utilizado en el proceso de producción cuando sea necesario (FPC S.A., 2018).

3.1.3 Preparación de pasta

La preparación de la pasta es un proceso que se compone de variadas etapas que incluyen:

3.1.3.1 Disgregación de la fibra

Para iniciar la preparación de la pasta, se selecciona la materia prima a utilizar, dependiendo de los requerimientos de producción, luego esta es trasladada a través de un transportador de fardos para ser alimentada al *pulper*. En este se transforma la materia prima en pasta, mediante la mezcla con agua, para la disgregación de las fibras hasta lograr un máximo nivel de consistencia de la pasta (ver Ecuación. 1), entre 4 – 4,5% en *pulper* primario y 2,5% en secundarios, para luego ser bombeada al estanque de almacenamiento, y a partir de este al resto del proceso. Durante este proceso el *ragger* elimina restos de plástico y pequeños metales, entre otros materiales presentes en la materia prima los cuales son desechados en fardos (Soto, 2015).

3.1.3.2 Limpieza

Luego de la disgregación de la fibra, la pasta es bombeada hacia los *cleaners* (o limpiadores centrífugos), que se encargan de eliminar pequeños residuos pesados, como arena, vidrio y fragmentos de metal de la pulpa mediante aceleración centrífuga. Al finalizar este proceso, la pasta posee una consistencia del 2,5% (ver Ecuación. 1).

3.1.3.3 Refinación y acondicionamiento

En el proceso de refinación se realiza un tratamiento mecánico a las fibras, haciendo pasar a la suspensión por distintos depuradores y/o cribado para obtener mejores propiedades en el papel, como la fibrilación o “peinado” y el corte, con el objeto de adaptarlas mejor para la formación sobre la máquina de papel (Soto, 2015; Biermann, 1996). El proceso de refinación y acondicionamiento requiere de la transición de tres etapas: el paso por depuradores, espesadores y refinadores como tal, estas etapas son descritas a continuación.

El depurador primario grueso (o fraccionador), el cual recibe el flujo de pasta proveniente de los *cleaners* se encarga de separar las fibras según su tipo (longitud) larga o cortas. El aceptado de las fibras cortas es enviado directo hacia los tres espesadores de fibra corta, los que se encargan de aumentar la consistencia de la pasta un 4,5%, para luego ser depositada en el estanque de fibra corta. El rechazo es recirculado al fraccionador luego de pasar por un *cleaner* de alta densidad y un fraccionador secundario, cuyo rechazo final es eliminado (Soto, 2015).

El aceptado de fibra larga del depurador primario grueso, es enviado hacia el depurador fino primario, el aceptado de este es dirigido hacia los 3 espesadores de fibra larga, y posteriormente se envía la pasta al estanque de fibra larga. El proceso de depuración se repite en el caso de los finos, donde se llega hasta una depuración terciaria (Soto, 2015).

Las pastas almacenadas en los estanques de fibra larga y corta son enviadas hacia los refinadores (de 1 a 3 en operación según necesidad), los que cumplen la función de adelgazar y juntar las fibras para obtener mayor calidad en el papel. Tras el proceso de refinación, las fibras se pliegan y aumentan su superficie, aumentando el aglomerado de las fibras, para ser enviadas a un estanque final en donde son mezcladas y almacenadas. Esta mezcla es enviada a la prensa de doble tela, que se encarga de extraer el agua de la pasta, aumentando su consistencia en un 20% aproximadamente (Soto, 2015).

3.1.4 Máquina Papelera

La máquina papelera es un equipo que cumple la función de formar, deshidratar, prensar y secar continuamente una suspensión de fibras de papel. Existen diferentes tipos de máquinas de papel, siendo las más utilizadas, las de extremo húmedo con mesa formadora *fourdrinier*, donde se aplica una suspensión diluida de fibras (típicamente con una consistencia de 0,3-0,6%) a una malla de alambre sin fin o tela de plástico) (Biermann, 1996). La máquina de papel de FPC consiste en una máquina mixta de formación, ya que posee 2 mesas planas de formación *fourdrinier*, una por línea *Top* la cual se encuentra en la parte superior, y otra por la línea *Back* en la parte inferior, ambas se juntan en un punto de unión (Soto, 2015).

Para la formación del papel la pasta debe pasar por diferentes sectores de la máquina papelera para llegar a su forma final, estos sectores se describen a continuación:

3.1.4.1 Caja de entrada

La caja de entrada es un aparato ubicado previo a la mesa formadora, que se encarga de transformar el flujo circular de pasta con una consistencia menor a 1%, en un flujo rectangular acorde al ancho de la máquina, al mismo tiempo que le entrega una velocidad igual o aproximada a la velocidad de la tela de la mesa formadora (Da Silva, 2009). Cumple con diferentes funciones tales como, extender la pasta de manera uniforme manteniendo los flujos y la consistencia constantes a lo largo de la mesa formadora, generar un gradiente de velocidad de pasta uniforme a lo largo de la máquina, crear una turbulencia adecuada para evitar la generación de floculación de las fibras y la descarga de un flujo constante de pasta y con el ángulo correcto sobre la mesa formadora (Da Silva, 2009). En FPC papeles existen dos cajas, la presente en la parte superior de la máquina (línea *Top*) y la de la parte inferior (línea *Back*).

3.1.4.2 Mesa de formación

La mesa formadora se encarga de la formación de la hoja de papel a través de un proceso de filtración, luego de recibir el chorro de la suspensión de fibras procedente de la caja de entrada sobre el soporte de formación, el cual está constituido por una tela de material metálico o sintético que posee una luz de malla del mismo orden de magnitud que la longitud de las fibras utilizadas. A partir de esto se genera la filtración del agua contenida en la suspensión, primero por efecto de a gravedad y luego por la generación de presión de vacío en el seno de la suspensión fibrosa hasta conseguir una estructura formada por fibras entrelazadas, compactas y con un grado de humedad lo suficientemente bajo como para permitir el paso de la hoja de papel formada a la operación siguiente, que se produce en las prensas, donde se continúa eliminando humedad (Da Silva, 2009). La sección de tela disminuye el contenido de humedad del 99 al 85-80% (SCA Publication Papers, 2015).

3.1.4.3 Prensado

La sección de prensado consiste en reducir el contenido de humedad de la hoja formada mediante drenaje y compresión, a través del paso por una serie de rodillos giratorios los cuales ejercen una presión mecánica determinada entre ellos en conjunto a capas de fieltro absorbente presente entre ambos. En esta operación, parte del agua del papel pasa al fieltro desde donde se extrae por vacío antes de volver a encontrarse con la hoja de papel (Sappi Idea Exchange, 2003). Al finalizar el proceso de prensado, la hoja de papel llega a alcanzar aproximadamente una humedad del orden del 50-60% (Da Silva, 2009). De esta manera también como consecuencia del proceso, se logra compactar las fibras de celulosa para incrementar la resistencia del papel mediante la presión ejercida por las prensas (CARTOPEL S.A.I., n.d.). La sección de prensado de la máquina papelería de FPC consiste en 2 prensas, la primera corresponde a la prensa *Hergen*, la cual opera a menor presión, y la prensa *Zapata*, la cual opera a una mayor presión.

Económicamente, la operación de prensado es importante por su bajo costo en comparación con los costos asociados con la eliminación del agua en la sección de secado (Da Silva, 2009).

3.1.4.4 Secado

En la sección de secado se elimina el agua remanente presente en la hoja de papel por evaporación, para reducir el contenido de humedad hasta un valor definitivo cercano al 8%. Para lograr este objetivo, la hoja de papel se pone en contacto con una serie de cilindros calentados interiormente con vapor. Los cilindros están dispuestos de modo de contactar primero con un lado del papel y luego con el otro para asegurar una deshidratación homogénea (SCA Publication Papers, 2015). En el proceso se generan condensados de vapor, los cuales es necesario extraer para evitar problemas en la operación (Soto, 2015).

3.1.4.5 Scanner

Finalizado el secado, el papel pasa por un scanner que entrega información de su perfil en gramaje y contenido de humedad, permitiendo el monitoreo de la calidad del papel saliente y la corrección de la entrada de pasta para el control de los perfiles de alta calidad (FPC S.A., 2018).

3.1.5 Bobinado y cortado

El papel fabricado es enrollado en un eje de acero llamado “Pope” para formar el “tambor” final (FPC S.A., 2018). Este último es desenrollado y cortado en diferentes medidas según el formato solicitado por el cliente, estos cortes son enrollados nuevamente en la bobinadora formando bobinas más pequeñas con diámetros y anchos determinados (Soto, 2015).

3.2 Control de calidad del papel

El personal de FPC Papeles realiza diferentes controles dentro del proceso productivo. Se toman muestras de pasta y del papel formado para revisar su consistencia, permeabilidad, peso, entre otras y analizar las propiedades para garantizar que los productos cumplan con las especificaciones indicadas por el cliente y retroalimentar al área de producción (Soto, 2015).

3.2.1 Laboratorio de pasta

En el laboratorio se mide el porcentaje de consistencia de pasta seca en 100 ml de agua, posterior a esto se mide drenabilidad (*Freeness*), demanda catiónica y retención de primer paso (FPR), para finalizar con el cálculo de turbidez de la pasta.

3.2.2 Laboratorio de papel

En el laboratorio de papel se realizan diferentes pruebas para verificar la calidad del papel a través de distintas propiedades del producto. A continuación, se describen las pruebas realizadas a los diferentes papeles producidos por FPC al papel se llevan a cabo según la norma TAPPI.

CMT (T809): Mide la resistencia al aplastamiento en plano de los papeles onda. El ensayo se realiza sobre una probeta de papel ondulado y cortada en sentido longitudinal de la máquina papelera (FPC S.A., 2018).

RCT (T822): Mide la resistencia a la compresión de borde de una probeta en forma de anillo, es cortada en sentido longitudinal (FPC S.A., 2018).

CCT (T824): Mide la resistencia a la compresión de canto o borde de una probeta de papel ondulado, es cortada en sentido longitudinal de la máquina papelera (FPC S.A., 2018).

Cobb 120 (T44): Mide la cantidad de agua que puede ser absorbida en 2 minutos por la superficie del papel. Se aplica solo a papeles encolados (FPC S.A., 2018).

Para conocer en detalle el proceso de fabricación de papel en base a cartón reciclado de FPC Papeles, ver ANEXO I, en este se encuentra descrita de manera más profunda cada etapa del proceso, y contiene fotografías tomadas de planta de los equipos que se utilizan para visualizar de forma más real el proceso.

3.3 Aditivos químicos / Química del extremo húmedo

Los aditivos químicos son sustancias y/o materiales utilizados para mejorar las propiedades del papel terminado o para ayudar en su fabricación. De acuerdo con esto, se clasifican en dos grupos, los aditivos funcionales que se utilizan para mejorar o proporcionar ciertas cualidades al papel producido y deben ser retenidos en la hoja para ser efectivos. Tales como, tintes, los agentes de encolado internos, los adhesivos para aumentar la resistencia en húmedo o en seco, y los rellenos. Por otra parte, encontramos a los aditivos de control los cuales se agregan para ayudar en la mejora del proceso de fabricación de papel, sin afectar directamente al producto y no siendo necesariamente retenidos en el papel. Entre estos encontramos biocidas, los agentes para la ayuda de drenaje y retención, los agentes de control de *Pitch* (basura aniónica) y *Stickies* (depósitos de contaminantes químicos), y los antiespumantes (Bajpai, 2018).

Dentro de los aditivos químicos más importantes en la fabricación de papel encontramos los pertenecientes a los programas de resistencia en seco, retención y drenaje, y encolado interno. Estos ayudan al cumplimiento de las especificaciones técnicas del cliente, y el control de ciertas variables de proceso. Otros tipos de aditivos utilizados en la fabricación de papel se describen en la Tabla 3.

3.3.1 Aditivos de resistencia en seco

La resistencia en seco corresponde a una propiedad estructural inherente de una hoja de papel que se debe principalmente al desarrollo de enlaces de fibra a fibra durante la consolidación y el secado de la suspensión de fibras en la fabricación de la hoja de papel. La resistencia del papel depende de la resistencia de las fibras individuales, la resistencia de los enlaces entre fibras, el número de enlaces (área enlazada), y la distribución de las fibras y enlaces (formación). Los aditivos de resistencia en seco pueden producir una mejora en uno o más de los factores mencionados, probablemente exceptuando la resistencia en las fibras individuales (Marton, 1996).

La refinación es quizás la herramienta más utilizada en la fabricación de papel para aumentar la resistencia a la tracción, entre otras propiedades. Sin embargo, ciertos aditivos químicos adicionados en el stock previo a la formación del papel constituyen una alternativa de reemplazo a la refinación para la mejora de la resistencia del papel.

Los aditivos de resistencia en seco son generalmente polímeros sintéticos y solubles en agua, hidrófilos naturales. Los más importantes comercialmente son: almidón catiónico, gomas vegetales naturales y polímeros de acrilamida (PAM), pero también existen otros que se utilizan en aplicaciones especiales como almidones no modificados (nativos) y modificados aniómicamente y derivados de celulosa solubles tales como carboximetilcelulosa, entre otros. La adición de estos aditivos también puede tener efectos secundarios como mejorar la retención de finos y en algunos casos también el drenaje, pero si son usados en exceso pueden afectar negativamente en otros aspectos como es la formación del papel (Marton, 1996).

En el proceso productivo de FPC papeles los aditivos de resistencia en seco que se utilizan corresponden a almidones catiónicos de distintas procedencias tales como mandioca, maíz, papa, entre otros. También se utiliza como alternativa almidón nativo (de naturaleza aniónica). Para conocer en qué etapa se agregan al proceso, ver ANEXO II.

3.3.2 Aditivos de control de retención y drenaje

La retención es una medida de la cantidad de pasta (o suspensión de fibras) que queda retenida en la tela de formación de la máquina de papel y se incorpora en la hoja final. Existen dos tipos de retención que se consideran en la industria papelería: la retención general y la de primer paso. Estas son definidas según contenido de sólidos retenidos (pasta/fibras), aunque también es importante la retención de finos de fibra, agentes de encolado y otros materiales (Bajpai, 2018). Los dos tipos de retención se representan como:

$$\text{Retención general (\%)} = \frac{\text{sólidos en la hoja}}{\text{sólidos agregados en el } \textit{furnish}} \times 100 \% \quad \text{Ecuación. 2}$$

$$\text{Retención de primer paso (\%)} = \frac{\text{sólidos en la hoja}}{\text{sólidos en caja de entrada}} \times 100 \% \quad \text{Ecuación. 3}$$

Es importante mantener una alta retención de primer paso para muchos aspectos de la química del extremo húmedo y de la calidad de la hoja de papel. Por ejemplo, una alta retención de primer paso de los aditivos ASA y/o AKD limitará su hidrólisis. La hidrólisis de estos químicos costosos significa que no contribuyen al encolado, pero pueden causar problemas de *pitch* (Bajpai, 2018).

La fibra es retenida de manera natural por filtración en la tela de formación, los finos y partículas de aditivos (rellenos, agentes de encolado interno, etc.) de tamaño relativo menor a la luz de malla de la tela de formación pueden ser filtrados, por lo que se requiere de aditivos químicos que permitan su permanencia en la hoja durante el proceso de formación (Clemo, 2018). La mayoría del material mal retenido está contenido en el flujo de agua blanca y regresa desde allí a la caja de entrada (Rantala, Ojala, Nokelainen & Kumpulainen, 2002). Los auxiliares de retención forman enlaces tanto con las superficies de la fibra como con todos los aditivos que deben retenerse. Los aditivos retenidos se retienen preferentemente sobre finos de fibra debido a su gran área superficial (ver Tabla A1 del ANEXO II). Los auxiliares de retención son a menudo polímeros que pueden depender de una alta densidad de carga para las poliaminas como la polietilenimina (PEI) o poli(cloruro de dialildimetilamonio) (DADMAC). Si la densidad de carga es baja, entonces se requiere un peso molecular más alto en el caso de PAM o incluso de almidón catiónico (Bajpai, 2018).

En el proceso productivo de FPC papeles se utilizan como agentes de retención coagulantes como la Polivinilamina (PVAm), cuyo nombre de producto es Xelorex RS1100, y floculantes como Poli(acrilamida) (PAM) Aniónica y Catiónica, cuyos nombres de productos es Percol 3035, Percol 63, etc. ambos aditivos de la empresa proveedora SOLENIS. En el ANEXO II se muestra la estructura química de ambos aditivos y su respectivo mecanismo de acción.

Los agentes de drenaje son aditivos que se utilizan para acelerar el drenaje del agua de la pasta en la tela de formación, y así facilitar el prensado y secado del papel (Samyn & Barhoum, 2018). La gran mayoría de los agentes de retención ayudan a mejorar la tasa de drenaje, debido a que los finos y rellenos son separados del agua blanca disminuyendo su contenido de sólidos, los efectos del drenaje y retención son difícil de distinguir entre ambos, por lo que generalmente se consideran juntos (Bajpai, 2018).

En el proceso de producción de FPC se utiliza como agente de drenaje principal Xelorex RS1100 (coagulante de Polivinilamina) y como alternativa Sulfato de Aluminio (para conocer en qué etapa se agregan al proceso, ver ANEXO II, Figuras A11 y A12), ambos considerados también como agentes de retención. Sin embargo, en el caso del primero sus efectos varían según su dosificación, que se explica en el ANEXO II.

3.3.3 Aditivos de encolado interno

El encolado interno (o en masa) del papel corresponde al desarrollo de la resistencia a la penetración (o absorción) de líquidos acuosos en la estructura interna de la hoja de papel (Bajpai, 2018). Esto se logra mediante la hidrofobización de los distintos componentes en la fabricación de papel, como las fibras de celulosa, gracias a la adición de aditivos químicos en la suspensión de fibras (o pasta) (Seppänen, 2007). Estos aditivos llamados agentes de encolado interno, cubren la superficie de las fibras de manera controlada, proporcionando una película resistente al agua (Clemo, 2018). Además de cumplir con el objetivo de mejorar las propiedades para retardar la penetración del agua (u otros líquidos) en el papel, el encolado también mejora la capacidad de impresión del papel debido al control de la dispersión y absorción de la tinta (Seppänen, 2007). El proceso de encolado se clasifica en masa y superficial, dependiendo de donde se aplica el agente encolante (antes o después de la formación del papel) (Abril & Mogollón, 2012).

Existen distintos tipos de encolado dependiendo de la dosificación de agente de encolado agregado, y que varían según la utilidad final del papel y el nivel de resistencia a la penetración del agua que necesita dicho papel para cumplir con su utilidad, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 1. Características del encolado según su tipo.

Fuente: Elaboración propia con información extraída de: (Clemo, 2018) y (Bajpai, 2018).

Nivel	Característica	Ejemplo
Super-encolado	Resistencia total a la penetración de líquidos	Papel siliconado
Encolado rígido	Alta resistencia a la penetración de líquidos	Papel de impresión
Encolado impreciso	Baja resistencia a la penetración de líquidos	Papel de periódico
Sin encolar	Nula resistencia a la penetración de líquidos	Papel Tissue

Características generales del encolado en masa

Las moléculas de encolado son anfipáticas que comprenden una cabeza hidrófila y una parte de hidrocarburo, que proporciona las propiedades hidrófobas deseadas (Seppänen, 2007). El extremo polar de las moléculas del agente encolante se fija por atracción electrostática, puentes de hidrógeno o por reacción química, con los grupos polares de los extremos no polares la celulosa, orientándose los extremos no polares hacia el exterior de la superficie, creando una capa hidrofóbica, que repele en agua, limitando su penetración, como se observa en la Figura 3 (Abril & Mogollón, 2012). Específicamente, los grupos funcionales anhídrido carboxílicos reaccionan con los grupos hidroxilo de la celulosa, para obtener el encolado mediante la formación de un enlace éster, aunque muchos sostienen que estos agentes se mantienen en realidad en la fibra mediante enlaces débiles (Bajpai, 2018).

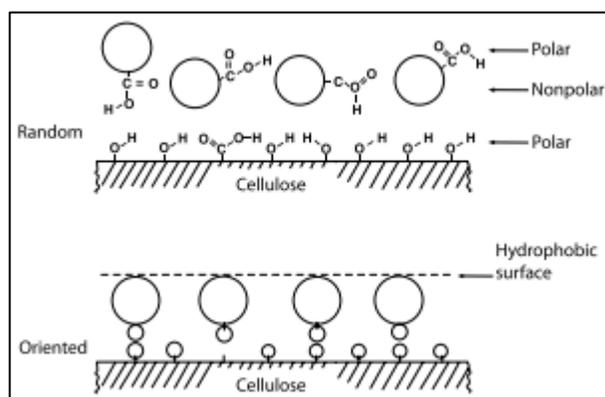


Figura 3. Orientación de las moléculas del agente encolante para lograr el encolado del papel.

Fuente: (Abril & Mogollón, 2012).

Algunas de las condiciones para un óptimo encolado son:

- El encolado del papel depende esencialmente de la retención, difusión, redistribución, y anclaje de partículas de encolado en las superficies de fibra y rellenos (Seppänen, 2007).
- No se retienen por sí mismas, necesitan de agentes de retención (Clemo, 2018).
- Parte del encolante podría hidrolizarse (ver hidrólisis de ASA y AKD en ANEXO II) a componentes no reactivos produciendo un bajo grado de encolado en la máquina (Encolado Fugitivo) y causa de depósitos (Clemo, 2018).

Agentes encolantes comunes

Existen distintos aditivos de encolado interno que se utilizan comúnmente, los cuales son la colofonia, el dímero de alquilceteno (AKD) y el anhídrido alquenilsuccínico (ASA) (Seppänen, 2007). El encolado con colofonia se debe realizar a pH 4-6, y el encolado con anhídrido alquenilsuccínico (ASA) o dímero de alquilceteno (AKD), ambos considerados como encolado alcalino, se realiza a pH 8 o superior. La fabricación de papel con encolado alcalino (AKD y/o ASA) es más frecuente en la industria papelera, debido a que genera ventajas importantes en comparación a la colofonia. Los papeles poseen mayor longevidad ya que no hay ácido residual presente para degradar los carbohidratos; el papel es más fuerte y menos quebradizo; hay menos corrosión en la máquina de papel; y hay menos problemas con el uso de fibra reciclada que contiene relleno de carbonato de calcio (Bajpai, 2018).

Basado en lo anterior, es de mayor relevancia conocer el funcionamiento y descripción del proceso de encolado alcalino con AKD y ASA. Sin embargo, el enfoque de este trabajo está centrado en el ASA, agente de encolado utilizado en el proceso productivo de FPC Papeles.

La estructura del ASA y AKD se muestran la Figura 4. El AKD se sintetiza por dimerización de los cloruros de acilo de los ácidos grasos (parte hidrófoba). El ASA se sintetiza con la reacción de mezclas de olefinas C-16 a C-20 con anhídrido maleico (Bajpai, 2018). Estos no son solubles en agua y deben agregarse al proceso como emulsiones, generalmente estabilizadas por almidón catiónico para mejorar su retención en las fibras cargadas negativamente (Seppänen, 2007).

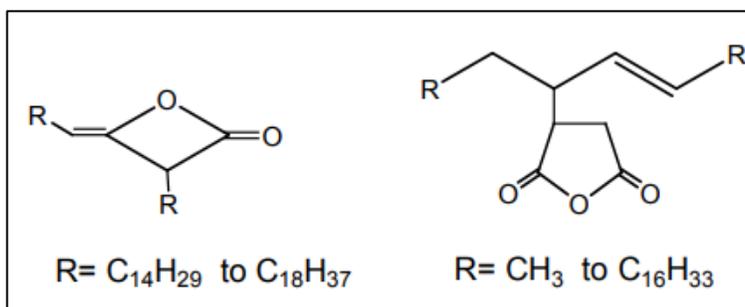


Figura 4. Estructura molecular de AKD (izquierda) y ASA (derecha).

Fuente: (Seppänen, 2007).

En la siguiente tabla, se muestran las ventajas y desventajas entre el uso de AKD o ASA como agente de encolado interno, que justifican la utilización de ASA en el proceso de FPC Papeles.

Tabla 2. Ventajas y desventajas de agentes de encolado neutro-alkalino.

Fuente (Clemo, 2018).

AKD	ASA
<p>Ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Disponibilidad de uso inmediata • Efectivo en pH neutro • Mínimo impacto en resistencia • Emulsión y Encolado estable 	<p>Ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Efectivo en pH neutro • Encolado rápido (↓ tiempo de curado) • Estabilidad de almacenado en bodega (pre-emulsión) • Mínimo impacto en resistencia
<p>Desventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Necesidad de ↑% de retención (>85%) • Encolado lento (↑ tiempo de curado) • Deslizamiento en máquina (bajo coeficiente de fricción de papel) 	<p>Desventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dificultad de uso (preparación de emulsión en planta) • Formación de depósitos por hidrólisis • Necesidad de ↑% de retención (>85%)

La principal diferencia por la cual se utiliza ASA en vez de AKD en el proceso de FPC Papeles, es su mayor reactividad, lo que permite lograr la mayor parte del efecto de encolado ya en la máquina de papel. El encolado de AKD, por otro lado, se desarrolla más lentamente y puede continuar durante varios días en rollos de papel (Roberts, 1996). Esto permite que las propiedades de papel o cartón sean controladas y medidas directamente, mientras que con AKD las mediciones no pueden realizarse de inmediato (Chávez, 2019). Para conocer otros aspectos importantes en el uso de ASA en la fabricación de papel y en qué etapa del proceso se agrega, ver ANEXO II.

En el ANEXO II se puede encontrar más información complementaria para comprender los mecanismos de acción de los diferentes aditivos químicos utilizados en la fabricación de papel, y lugar de dosificación en la planta de FPC Papeles, entre otros conceptos para comprender de mejor manera la química del extremo húmedo.

3.3.4 Otros aditivos utilizados en la fabricación de papel

Existen una serie de aditivos químicos complementarios que se utilizan en la fabricación de papel, los cuales se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 3. Descripción de otros aditivos químicos utilizados en la fabricación de papel.

Elaboración propia con información extraída de: (Bajpai, 2018).

Tipo de aditivo	Grupo	Descripción	Ejemplos
Rellenos	Aditivos funcionales	Se agregan al stock para mejorar la opacidad y el brillo de los papeles de impresión.	PCC, Arcilla (o caolín), talco, tiza, etc.
Tintes	Aditivos funcionales	Son colorantes solubles en agua que se agregan al stock para dar color al producto.	Pigmentos azoicos y de estilbeno.
Abrillantadores	Aditivos funcionales	Se usan para iluminar el papel, son incoloros y convierten la luz UV invisible en luz visible de menor energía.	Estilbenos, azoles, cumarinas, pirazenos o naftalimidias.
Agentes de resistencia en húmedo	Aditivos funcionales	Son resinas termoestables que se agregan al stock para impartir resistencia en húmedo al papel.	Resinas PAM, Urea-formaldehído y Melamina-formaldehído.
Antiespumantes y desespumantes	Aditivos de control	Se encargan de desestabilizar las espumas existentes y evitar la formación de nueva espuma.	Surfactantes antiespumantes como oligómeros de OE u PO.
Biocidas	Aditivos de control	Se utilizan para evitar la formación de microorganismos como bacterias y hongos.	Cloro y/o dióxido de cloro, sales de amonio cuaternario, y/o glutaraldehídos.
Controladores de depósitos	Aditivos de control	Se utilizan para controlar depósitos orgánicos o inorgánicos.	Agentes secuestrantes como quelantes e inhibidores de umbral, y surfactantes o dispersantes no iónicos.
Controladores de pH	Aditivos de control	Se utilizan para regular el pH del proceso y mantenerlo neutro.	Ácido sulfúrico y/o Dióxido de carbono.

4. OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS

4.1 Objetivo General

- Identificar parámetros de proceso que determinen el uso de ASA en la producción de FPC Papeles y proponer alternativas de mejora.

4.2 Objetivos Específicos

- Analizar el comportamiento histórico de consumo de químicos, variables de proceso y valores de calidad del papel de la producción de FPC Papeles.
- Identificar alternativas de mejora en el proceso de producción, pruebas de calidad y/o en la formulación de receta de químicos para la fabricación de FPC Papeles.

5. METODOLOGÍA

5.1 Recursos materiales y equipamiento

- Notebook Lenovo Modelo ThinkPad Edge E440.
 - Procesador Intel Core I5.
 - Sistema operativo Windows 10 Pro 64 Bits
- Software Microsoft Office 365 Business
 - Herramienta Microsoft Excel, utilizada para recopilación, tratamiento y análisis gráfico de datos.
- Planillas de registros de producción de FPC Papeles de 2016 a 2019.
 - Reportes de consumo de químicos: Registros diarios, por diferencia de volumen presente en estanques de almacenamiento respecto del día anterior.
 - Reportes de toneladas producidas y rechazo: Registros por cada parada producida, tomando peso de bobinas, rechazos y rodela, considerando un rango de 30 a 50 paradas por día.
 - Reportes de control de laboratorio calidad: Registros por “set” de tambor producido. La periodicidad de las muestras dependerá del número de set que posea el tambor (capacidad de 1 a 3), el tiempo que se tarda en extraer la muestra si el tambor es de un solo set es de 20 minutos promedio, por lo que los registros de calidad se realizan entre cada 20 minutos (1 set) a 1 hora (3 sets).
 - Reportes de control de laboratorio pasta: Los registros se realizan cada 1 hora durante el día (de 8.00 am a 23.00 pm) intercalando los recorridos entre horas par e impar. Para las horas pares el recorrido abarca la cuba máquina *Top/Back*, cajón presión y agua bajo tela *Back*, entrada y salida refinadores, y entrada y salida DAF (Clarificador). Para las horas impares el recorrido abarca las bombas 15PU50, 15PU34, estanques de fibra corta y larga, y estanque de pasta refinada 15C21.

5.2 Procedimiento

La metodología utilizada para el análisis de datos de parámetros de proceso de la producción de FPC Papeles a través de Excel se resume y describe a continuación:

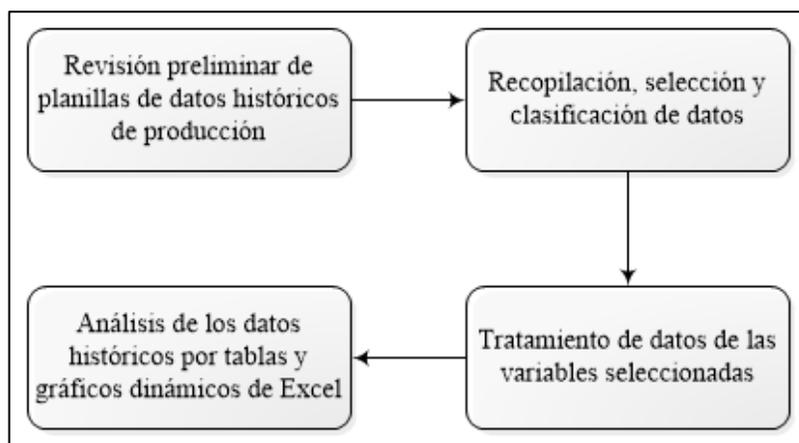


Figura 5. Pasos del procedimiento de análisis de datos de parámetros de proceso de la producción de FPC Papeles.

Fuente: Elaboración propia.

5.2.1 Revisión preliminar de planillas de datos históricos de producción

Se realizó una revisión preliminar de las planillas de datos de producción de FPC Papeles con el fin de llevar a cabo el reconocimiento de los tipos de papeles y gramajes producidos. Se revisaron los registros de consumo de químicos, pruebas de laboratorio y variables de proceso reportadas en las fechas y periodos de tiempo de control de calidad y producción. Esto, para comprender el orden y estructura de los reportes, y asociar su información con lo estudiado en la revisión bibliográfica.

5.2.2 Recopilación, selección y clasificación de datos

Una vez revisado el contenido de los reportes mencionados en la sección 5.1, se procedió a realizar una primera selección de las secciones de los reportes, los cuales fueron traspasados a una nueva planilla de Excel para la posterior clasificación de los datos por “Tipo de Papel” y “Gramaje”, las secciones seleccionadas fueron las siguientes:

- Consumo de químicos: Sección seleccionada para obtener el reporte de los kilogramos de cada uno de los productos químicos consumidos. Los valores fueron ingresados por fecha, tipo de papel producido, producción en toneladas, gramaje (g/m^2), producto químico consumido (código), programa de producción, entre otros.
- Producción: Sección seleccionada para obtener el reporte de la Producción Papel Pesado (toneladas papel “aceptado”), toneladas correspondientes a rodelas (recortes sobrantes del “tambor” de papel producido), y toneladas correspondientes al rechazo, para de esta manera obtener las “Toneladas Pope” (suma total entre toneladas producción PP, rodelas y rechazo). Los valores fueron ingresados por fecha, tipo de papel producido, producción en toneladas, gramaje (g/m^2), programa de producción, turno, parada, entre otros.
- Parámetros de laboratorio de calidad: Sección seleccionada para obtener los parámetros de calidad papel, de gramaje de laboratorio, humedad de laboratorio, CMT, CCT, RCT, Cobb Top (cara superior) y Cobb Back (cara inferior). Los valores fueron ingresados por fecha, hora de realización de prueba, número de tambor, tipo de papel y gramaje de producto.
- Parámetros laboratorio de pasta: Sección seleccionada para obtener los parámetros de consistencia, *freeness*, demanda catiónica, turbidez y retención de primer paso (FPR) de diferentes tramos dentro del proceso (cuba de máquina, agua bajo tela, bomba, refinadores, etc.). Los valores fueron ingresados por fecha, hora de realización de prueba, y gramaje de papel a producir.

En la siguiente tabla se resumen las variables seleccionadas por sección:

Tabla 4. Selección de variables a analizar por sección.

Fuente: Elaboración propia.

Sección	Etapa del proceso	Variables seleccionadas	Unidad
Consumo de químicos	Máquina Papelera	Consumo de químicos por día	(kg)
Producción	Bobinado y cortado	Producción pope (Producción PP + Rodelas + Rechazo)	(Ton)
Parámetros laboratorio de calidad	Control de calidad: Laboratorio de papel	Gramaje laboratorio	(g/m ²)
		Humedad laboratorio	(%)
		CMT	(Lb _f)
		CCT	(Lb _f /6 In)
		Cobb <i>Top</i>	(g/m ²)
		Cobb <i>Back</i>	(g/m ²)
Parámetros laboratorio de pasta	Control de calidad: Laboratorio de pasta	Consistencia	(% p/v)
		<i>Freeness</i>	(°CSF)
		Demanda catiónica	(-ueq/L)
		Turbidez	(ntu)
		Retención de primer paso (FPR)	(%)

Separadas las secciones mencionadas de sus planillas Excel de procedencia, los datos obtenidos de las secciones son clasificados en pestañas nuevas por tipo de papel y gramaje (Ejemplo: Papel Onda Encolado 100 g/m²). En la Tabla 5 se muestran los Papeles y gramajes a analizar. También se ordenaron y/o calcularon los valores por fecha, el procedimiento para cada variable se resumen la Tabla 6.

Tabla 5. Lista de tipo de papel y gramajes analizados.

Fuente: Elaboración propia, con datos de FPC Papeles S.A.

Tipo de papel	Gramaje (g/m ²)	Producción en 2018 (ton/año)	% Producido respecto del total en 2018	Nivel de gramaje representado	% Producción del nivel respecto al total en 2018
Onda Encolado	120	10 mil	10	Bajo	39
	145	16 mil	15	Medio	15
	180	7 mil	7	Alto	14

Tabla 6. Resumen descripción cálculo de valores diarios de variables seleccionadas.

Fuente: Elaboración Propia.

Variables	Descripción de cálculo	Función Excel	Unidad
Consumos específicos de químicos por día	Suma de todos los valores de consumo de un químico en específico de la sección "Consumo de químicos", tomando como criterio la fecha de consumo, tipo de papel y gramaje, y división de esta suma por la producción pope	SUMAR.SI.CONJUNTO / División	(kg/Ton)
Producción pope (Producción PP + Rodelas + Rechazo) por día	Suma de todos los valores de producción pope de la sección "Producción", tomando como criterio la fecha de producción, tipo de papel y gramaje	SUMAR.SI.CONJUNTO	(Ton)
Gramaje laboratorio	Cálculo del promedio de cada valor físico de la sección "Parámetros laboratorio de calidad", tomando como criterio la fecha de producción, tipo de papel y gramaje	PROMEDIO.SI.CONJUNTO	(g/m ²)
Humedad laboratorio			(%)
CMT			(Lb _f)
CCT			(Lb _f /6 In)
Cobb Top			(g/m ²)
Cobb Back			(g/m ²)
Consistencia	Cálculo del promedio de cada valor de pasta de la sección "Parámetros laboratorio de pasta", tomando como criterio solo la fecha de producción	PROMEDIO.SI.CONJUNTO	(% p/v)
Freeness			(°CSF)
Demanda catiónica			(-ueq/L)
Turbidez			(ntu)
Retención de primer paso (FPR)			(%)

5.2.3 Tratamiento de datos de las variables seleccionadas

Ya recopilados los datos de las variables seleccionadas en planilla Excel para la realización del análisis, es necesario previamente realizar un tratamiento de los datos, verificando los valores atípicos de las pruebas de laboratorio que se alejan en gran medida de los rangos usuales establecidos según la solicitud del cliente, los cuales se pueden dar por factor humano, al ingresar los datos en los reportes por parte del personal de laboratorio. En la siguiente tabla se muestran los rangos utilizados como criterio para la eliminación de valores atípicos:

Tabla 7. Rangos para eliminación de valores atípicos de laboratorio de calidad y pasta.

Fuente: Elaboración propia.

Variable	Rangos
Consistencia	0-10
Freeness	50-800
Retención (FPR)	0-100
Turbidez	10- infinito
Demanda Catiónica	Valores enteros
Gramaje	90-300
Humedad	5-15'
CMT	38-100
CCT	40-160
RCT	20-120
Cobb Top	25-45
Cobb Back	25-45

En consiguiente a lo anterior, pero esta vez considerando todas variables seleccionadas, se procedió a reemplazar todos los valores “cero” presentes, por “celdas vacías”, para de esta manera no afectar en el siguiente paso a seguir correspondientes al análisis por tablas y Gráficos dinámicos de Excel, debido a que el programa trabaja con distintos tipos de cálculo (promedio, suma, conteo, desviación estándar, etc.) para resumir el “campo de valor” (o variable) seleccionada, y de esta forma no llegar a formular una interpretación errónea del análisis gráfico de las variables seleccionadas.

5.2.4 Análisis de los datos históricos por Tablas y Gráficos Dinámicos de Excel

Finalmente, ya llevadas a cabo las etapas anteriores, se procedió al análisis gráfico de las variables a través de Tablas Dinámicas y Gráficos Dinámicos de Excel. Se utilizaron estas herramientas, ya que permiten ordenar y resumir la información, y visualizar por separado cada conjunto de variables de manera que el análisis sea más rápido y sencillo.

Los análisis realizados fueron respecto al comportamiento en el tiempo de las distintas variables, en el periodo entre enero de 2016 hasta abril 2019, con el fin de visualizar tendencias de alzas y/o bajas durante lapsos de tiempos definidos respecto al consumo de químicos con mayor enfoque en el consumo de ASA (Basoplast). Luego se relacionó estas tendencias con el análisis del comportamiento de los costos de consumo, y las pruebas de laboratorio con mayor atención en los valores de los test Cobb, y las demandas catiónicas del agua bajo tela de las mesas de formación Top y Back.

En la Tabla 8 se presentan los tipos de análisis y las variables analizadas en cada uno para cada tipo de papel y gramaje (en negrita se encuentran las variables de mayor enfoque).

Tabla 8. Variables seleccionadas para los análisis gráficos por papel y gramaje.

Fuente: Elaboración propia.

Tipo de análisis gráfico	Variable eje X	Variable eje Y
Comportamiento del consumo específico de químicos de 2016 a 2019	Fecha / Meses / Años	Promedio de consumo específico de Almidón Catiónico de Mandioca Excelcat 30 (Tailandes)
		Promedio de consumo específico de Almidón Nativo de Maíz
		Promedio de consumo específico de Basoplast 689
		Promedio de consumo específico de Luderur 30
		Promedio de consumo específico de Sulfato de Aluminio 50%
		Promedio de consumo específico de Bentonita (Hydrocol CH)
		Promedio de consumo específico de Percol 3035 (182)
		Promedio de consumo específico de Xelorex RS1100
		Promedio de consumo específico de Afranil FL
		Promedio de consumo específico de Xelorex B2000
Comportamiento de los parámetros de calidad del papel de 2016 a 2019	Fecha / Meses / Años	Promedio de Gramaje laboratorio
		Promedio de Humedad laboratorio
		Promedio de CMT
		Promedio de CCT
		Promedio de Cobb <i>Top/Back</i>
Comportamiento de los parámetros de laboratorio de pasta de 2016 a 2019	Fecha / Meses / Años	Promedio de Consistencia en distintos puntos del proceso
		Promedio de <i>Freeness</i> en cajón presión <i>Top/Back</i>
		Promedio de Demanda catiónica en distintos puntos del proceso
		Promedio de Turbidez en distintos puntos del proceso
		Promedio de Retención de primer paso (FPR) <i>Top/Back</i>

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan como resultados más importantes, las gráficas obtenidas que evidencian cambios en el comportamiento histórico de ciertas variables de proceso analizadas. Estas variables son: Retención de primer paso (FPR), Demanda Catiónica en distintos puntos del proceso, consumos específicos de agentes de retención (Percol 3035), Drenaje (Xelorex RS 1100) y encolado interno (ASA, Basoplast 689). El resto de las variables tratadas en la metodología, no se presentan en esta sección debido a que no evidencian un cambio relevante en el comportamiento a través del periodo de tiempo analizados, en parte porque algunas de estos resultados son obtenidos debido a la manipulación de las variables mencionadas, por ejemplo los valores de las pruebas de laboratorio de calidad de papel (CMT, RCT, CCT y Cobb) y algunas pruebas de pasta (*freeness*, turbidez y consistencia), donde se manipulan variables como el consumo de químicos, ya sea para entregar directamente una propiedad (encolado interno), o controlar una variable del proceso que tenga consecuencias en los valores de calidad (retención y drenaje). Otras variables no fueron consideradas en el análisis final, debido a que la población de datos no era la suficiente para entregar resultados concluyentes respecto a la problemática (contenido de humedad y gramaje de laboratorio).

6.1 Resultados y discusión del comportamiento en el tiempo de DCABT y consumos específicos de Basoplast y Xelorex RS1100 en papeles OE de 120, 145 y 180 g/m²

En las figuras 6, 7 y 8 se gráfica el comportamiento en el tiempo de los consumos específicos promedio de Basoplast 689 y Xelorex RS1100, junto a las DCABT *Top* y *Back*.

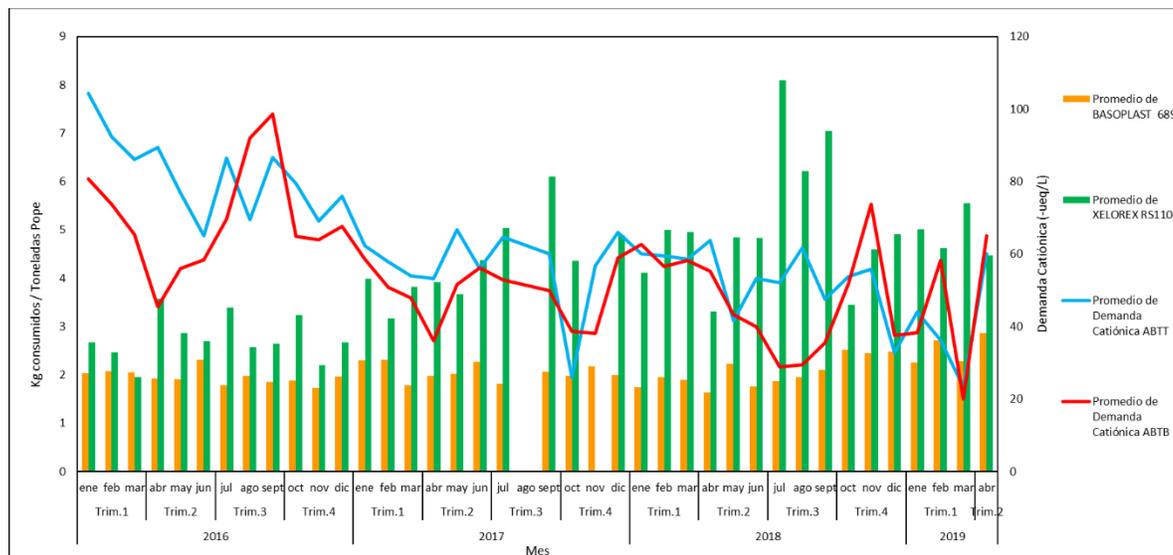


Figura 6. Comportamiento en el tiempo de DCABT y consumos específicos de Basoplast y Xelorex RS 1100 en la producción de Papel OE 120 g/m².

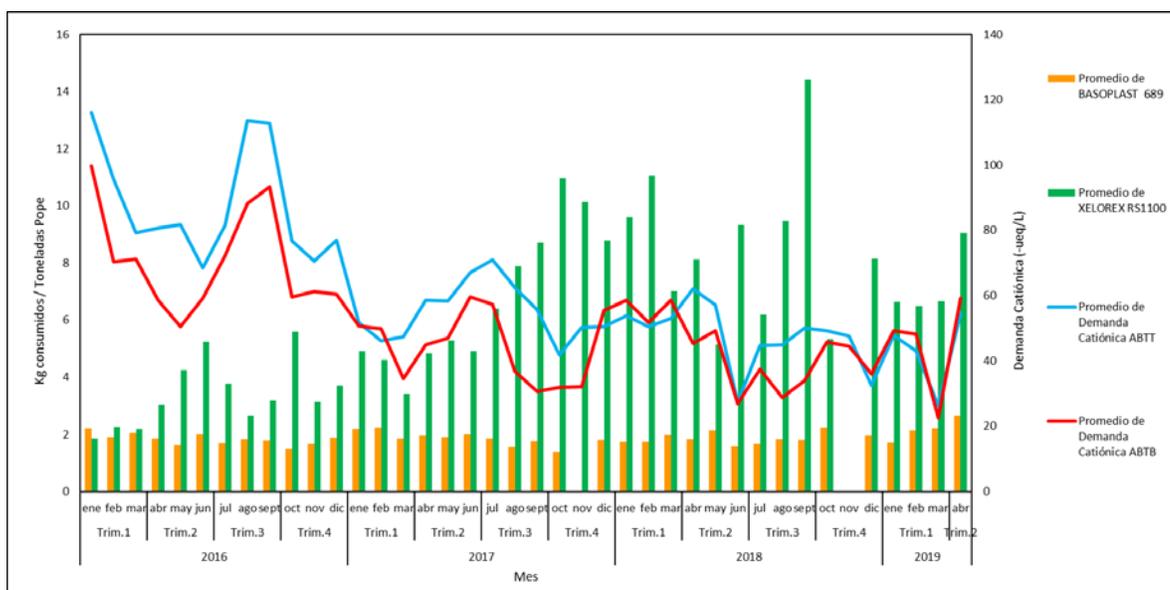


Figura 7. Comportamiento en el tiempo de DCABT y consumos específicos de Basoplast y Xelorex RS 1100 en la producción de Papel OE 145 g/m².

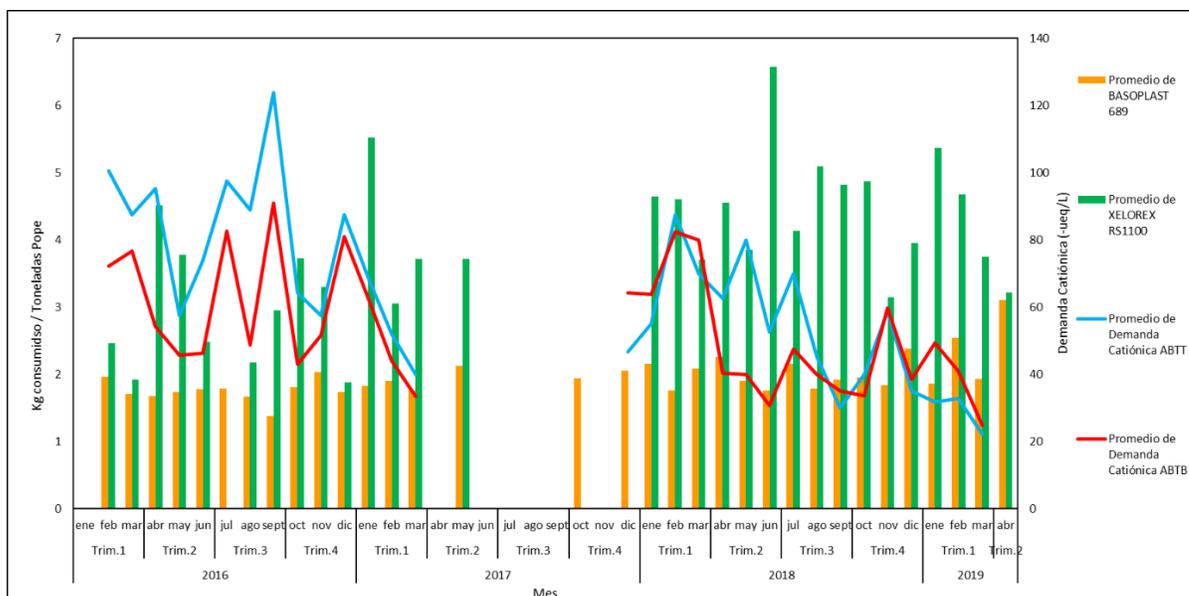


Figura 8. Comportamiento en el tiempo de DCABT y consumos específicos de Basoplast y Xelorex RS1100 en la producción de Papel OE 180 g/m².

En las Figuras 6, 7 y 8 se observa que durante el periodo del año 2016 las DCABT de las mesas de formación *Top* y *Back* rondaban valores en un rango promedio de 80 a 100 $\mu\text{eq/L}$, gran diferencia si comparamos con el rango de operación actual, que ronda entre los valores promedio de 40 a 60 $\mu\text{eq/L}$, coincidente al aumento del consumo específico de Xelorex RS1100. Esto se debe principalmente a que Xelorex RS1100 corresponde a un agente de retención y drenaje, específicamente a un coagulante de polivinilamina el cual posee una gran carga catiónica que al entrar en contacto con la fibra (carga aniónica), cambia la carga del sistema dependiendo de su dosificación, de tal manera que, a mayor dosificación de este agente, menor va a ser la demanda catiónica presente en al ABT (Biermann, 1996). Sin embargo, cabe destacar que en el último periodo entre julio 2018 a abril 2019 se observa un aumento en los consumos de ASA (Basoplast 689) coincidente a la baja DCABT, por lo que se asume la existencia de un factor en el proceso que afecta en sobreconsumo de ASA, el cual al necesitar almidón catiónico (*carrier*) que comparte la misma carga que Xelorex RS1100, compiten entre sí para su adhesión a las fibras de carga de negativa (*), por lo que es de gran importancia la magnitud de la demanda catiónica presente en la suspensión previa a la adición de los químicos, para saber si será más o menos efectiva durante el proceso. Considerando esto último es que se decidió analizar la demanda catiónica de diferentes puntos del proceso como se observa en las Figuras 12, 13 y 14.

(*): Según comunicación personal con Pablo Gómez Asesor de FPC, el 24/05/2019 en Oficinas de FPC.

El consumo específico de Xelorex RS1100, es mayor en los papeles de gramaje alto, debido a que, en los de menor gramaje, el drenaje se da en gran parte de manera natural por gravedad y luego por vacío, esto se debe a que los flóculos generados en la formación son más pequeños, almacenando menor cantidad de agua en su interior facilitando el drenaje (Da Silva, 2009). El caso contrario se da en los gramajes altos, debido a la mayor concentración de fibras en suspensión, las cuales al unirse forman grandes flóculos los que almacenan mayor cantidad de agua en su interior, siendo más compleja su eliminación por drenaje natural por gravedad o vacío, por lo que se agrega mayor cantidad de coagulante de tal manera que se generen coágulos para la formación de flóculos más compactos beneficiando al drenaje y la formación (Clemo, 2018). A pesar de las diferentes tendencias presentes en las Figuras 6, 7 y 8, no se logra evidenciar un factor clave que explique la problemática planteada en este trabajo. Sin embargo, se logra respaldar la existencia de la problemática en la tendencia al alza en el consumo específico de ASA mostrada en las gráficas.

6.2 Resultados y discusión del comportamiento en el tiempo de retención de primer paso (FPR) Top y Back y consumos específicos Percol 3035 en papeles OE de 120, 145 y 180 g/m²

En las figuras 9, 10 y 11 se gráfica el comportamiento en el tiempo de los consumos específicos promedio de Percol 3035 junto a las FPR *Top* y *Back*.

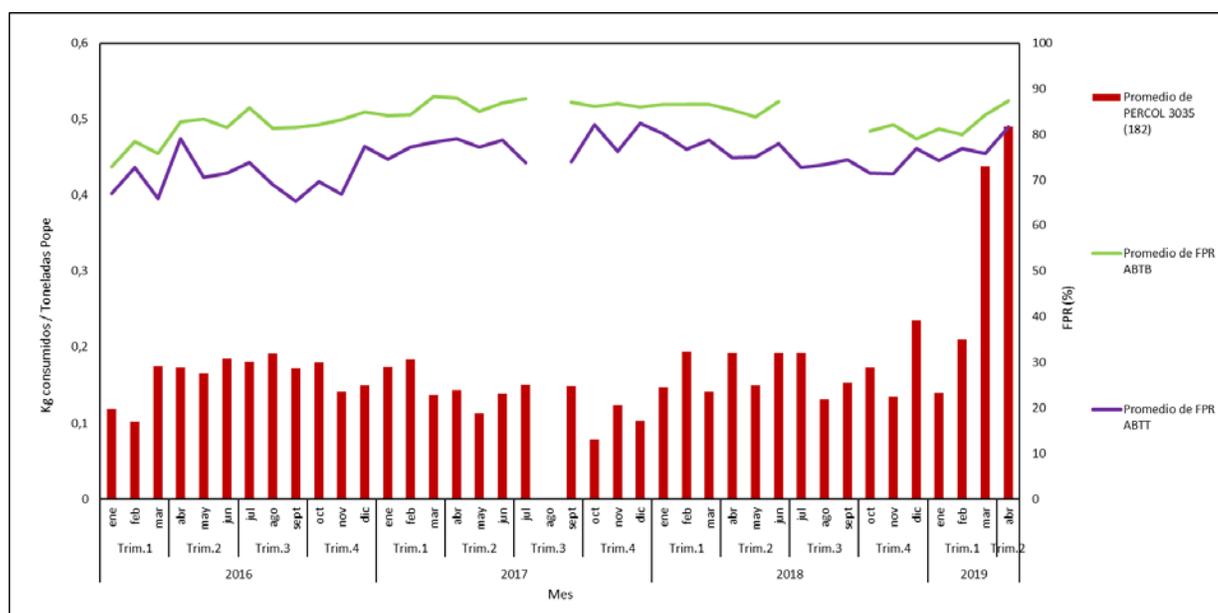


Figura 9. Comportamiento en el tiempo de valores de retención de primer paso (FPR) *Top* y *Back* y consumos específicos Percol 3035 en la producción de Papel OE 120 g/m².

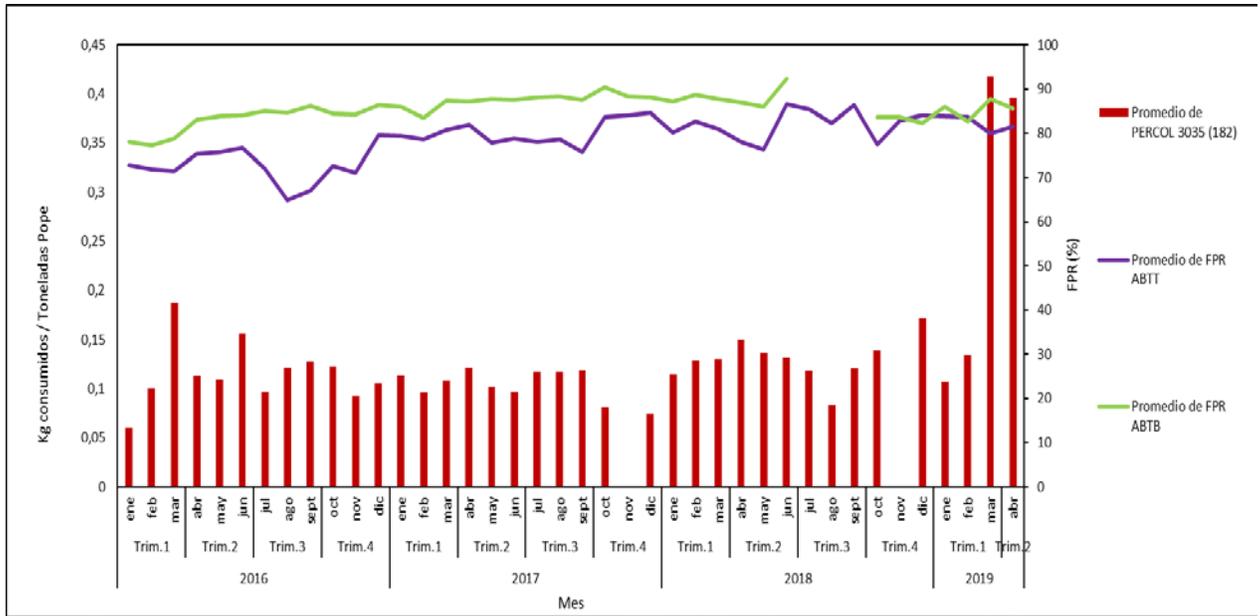


Figura 10. Comportamiento en el tiempo de valores de retención de primer paso (FPR) *Top* y *Back* y consumos específicos Percol 3035 en la producción de Papel OE 145 g/m².

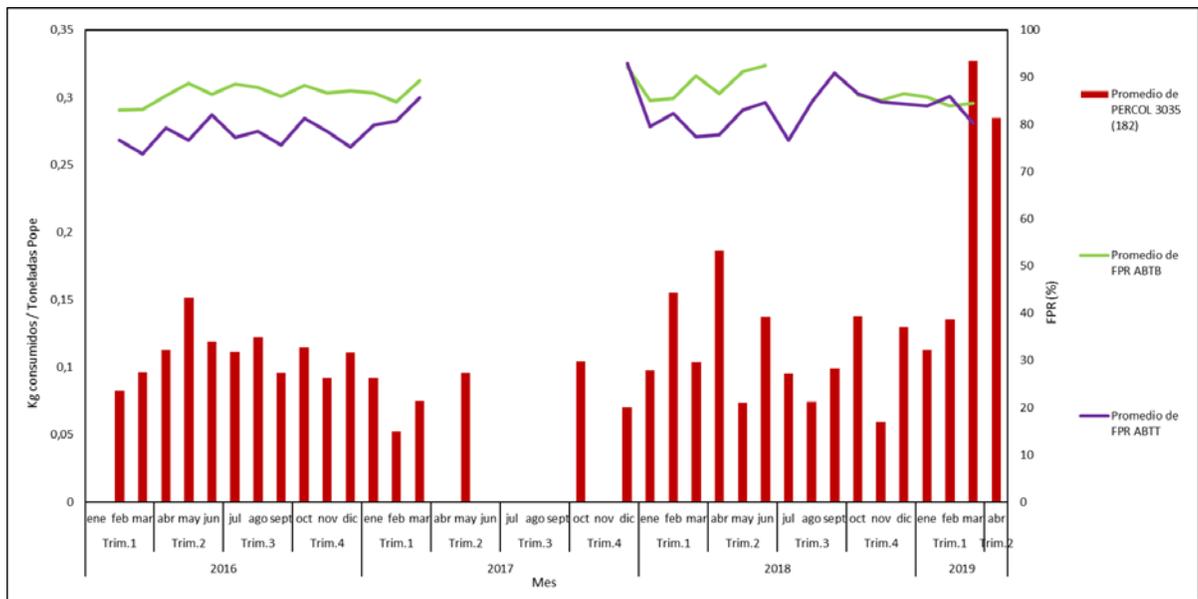


Figura 11. Comportamiento en el tiempo de valores de retención de primer paso (FPR) *Top* y *Back* y consumos específicos Percol 3035 en la producción de Papel OE 180 g/m².

Analizado las Figuras 9, 10 y 11, se logra observar que no existen tendencias claras de aumento o reducción en los valores de retención de primer paso, debido a que este es un valor que se va controlando en el transcurso de proceso con la adición de químicos, como en este caso el Percol. Como se ya se explicó en la revisión bibliográfica, el Percol es un agente de retención que corresponde a un floculante catiónico de baja densidad de carga y alto peso molecular, por lo que su consumo se va regulando respecto al consumo de Xelorex, ya que cumplen funciones complementarias (Bajpai, 2018). Como se mencionó en la discusión anterior, el Xelorex ayuda a la formación de flóculos compactos debido a la generación de coágulos, para beneficiar el drenaje en papeles de mayor gramaje. En cambio, el Percol ayuda a la retención con la formación de flóculos grandes menos compactos, con mayor cantidad de espacios vacíos entre la aglomeración de fibras, por lo que el agua queda almacenada dentro de ellos y se vuelve más complejo el drenaje de manera natural o al vacío. De esta forma, el Percol se utiliza en mayor proporción en los papeles de gramaje bajo, donde existe una mayor cantidad de finos y fibras de menor tamaño que se escapan por el agua bajo tela, por lo que la aplicación de Percol ayuda a retenerlos, sin embargo, se estropea la formación de la hoja de papel (Clemo, 2018). Considerando la gran área superficial de los finos (ver Tabla A1, ANEXO II), las partículas de ASA se suelen adherir fácilmente a su superficie, como también a la basura aniónica, y al estas escapar en el agua bajo tela, se generan pérdidas de encolado.

Como se muestran en las figuras 9, 10 y 11, los valores de retención de primer paso en el último periodo se encuentran cercanos al 80 – 90 %, con el porcentaje restante siendo retenido después o perdiéndose en el agua bajo tela. Es por esto por lo que considerando las posibles pérdidas de ASA en los finos del agua bajo tela en el periodo de marzo y abril de 2019, se decidió aumentar la dosis de Percol de manera de retener finos, y en consecuencia también del ASA, para así disminuir los consumos de este. Aunque en este análisis no se logra evidenciar una causa de la generación de sobreconsumo de ASA, si se destaca una posible solución tomando en cuenta la pérdida de ASA por los finos y *stickies* en el agua bajo tela. Sin embargo, aumentar los consumos de Percol no es una solución permanente ni efectiva, debido a su alto costo en comparación a los demás aditivos, y su efecto negativo en la formación.

6.3 Resultados y discusión del comportamiento en el tiempo de demandas catiónicas en distintas etapas del proceso de producción de Papeles OE de 120, 145 y 180 g/m²

En las figuras 12, 13 y 14 se observan las demandas catiónicas graficadas en los distintos puntos del proceso según su avance desde el flujo de la bomba 15PU50, la cual recibe la pasta desde la salida del *pulper* primario hasta los cajones de presión (o cajas de entrada) del *top* y el *back* de la máquina de papel. Como se puede observar los valores de demanda catiónica son menores en las etapas más avanzadas y mayores en las etapas cercanas al inicio del proceso, esta disminución de la demanda catiónica durante el proceso se explica por las diferentes etapas de limpieza y depuración de la suspensión de fibras, en las que se eliminan una gran cantidad de contaminantes y basura aniónica derivados del reciclaje, y que afectan a la carga del sistema. Considerando esto, se puede observar que durante 2016 las demandas catiónicas en los diferentes puntos de muestreo eran superiores a las presentes durante 2017, 2018 y 2019, por lo que se justifica con los menores consumos de Xelorex, ASA y Percol en esos periodos debido a que, con la mayor presencia de carga aniónica en el sistema, se facilita la adherencia de estos aditivos catiónicos en la superficie de las fibras.

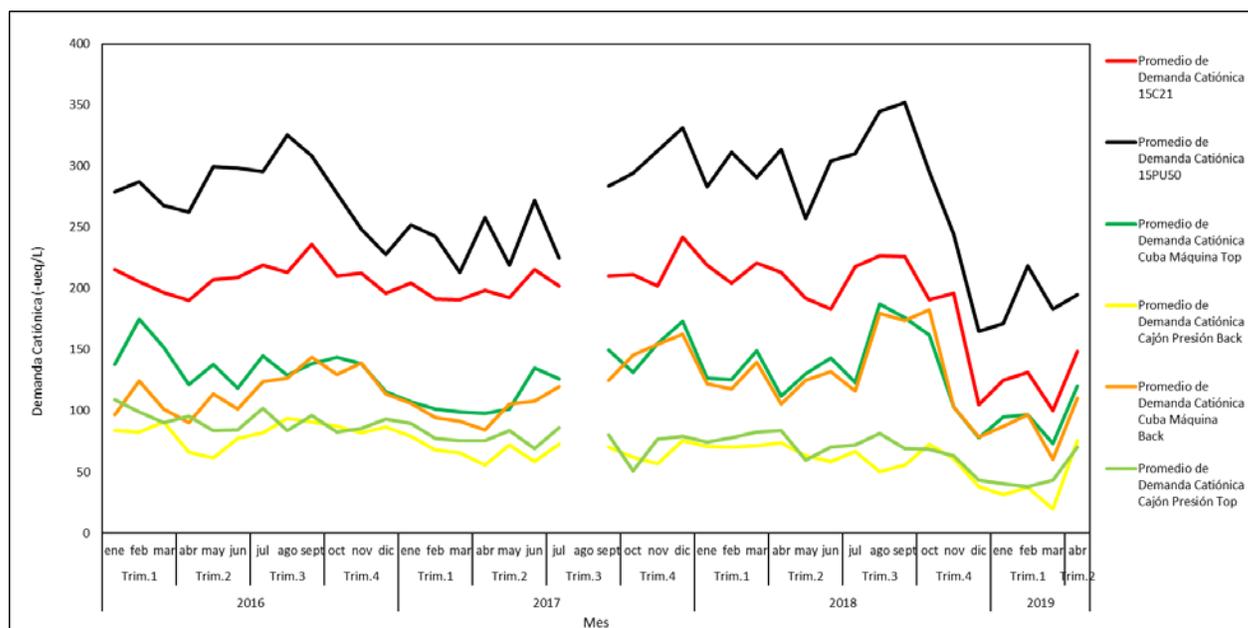


Figura 12. Comportamiento en el tiempo de demandas catiónicas en distintas etapas del proceso de producción de Papel OE 120 g/m².

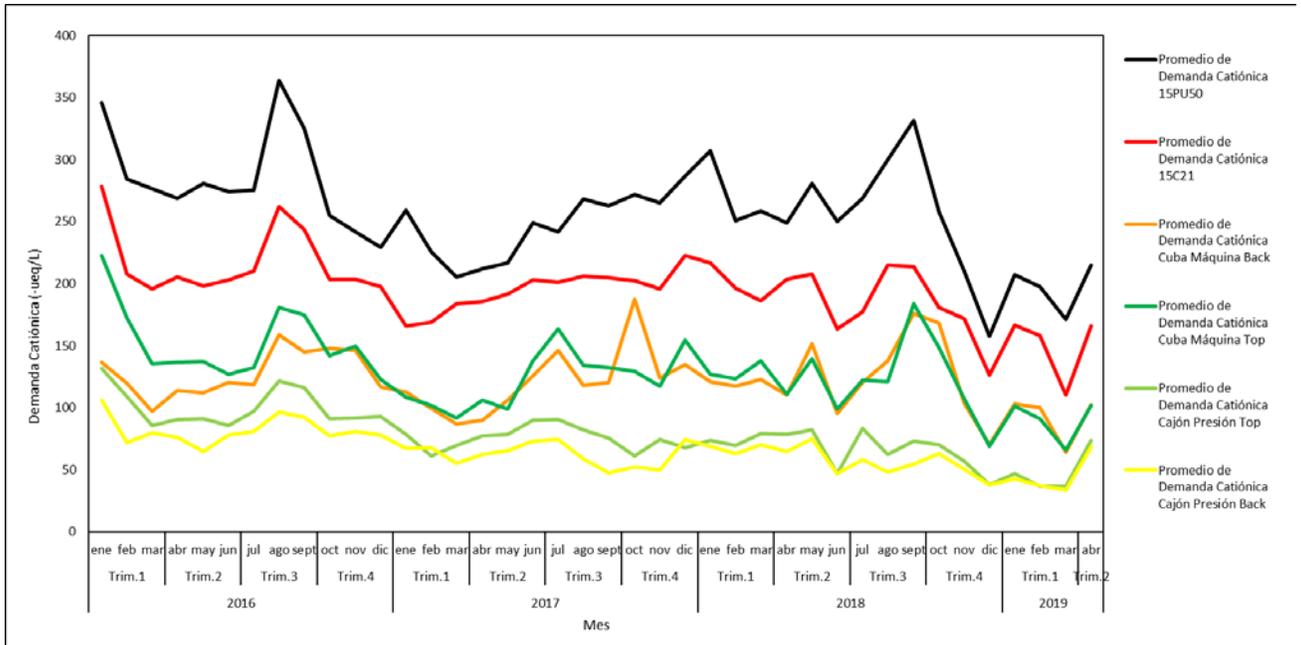


Figura 13. Comportamiento en el tiempo de demandas catiónicas en distintas etapas del proceso de producción de Papel OE 145 g/m².

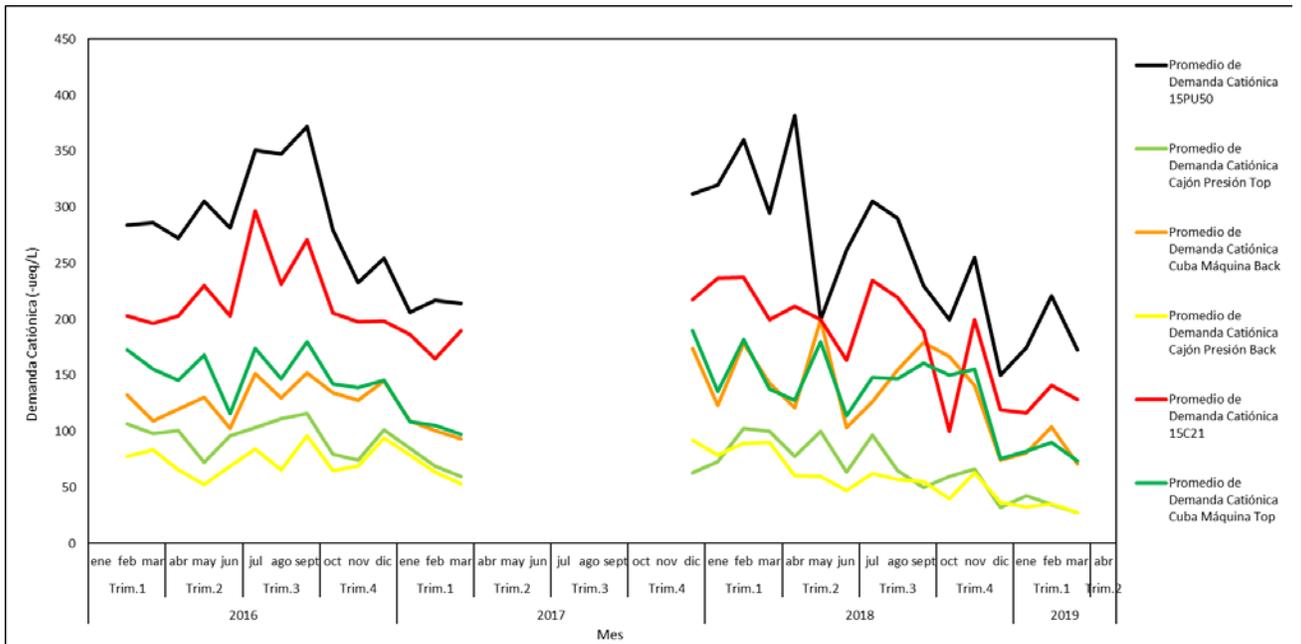


Figura 14. Comportamiento en el tiempo de demandas catiónicas en distintas etapas del proceso de producción de Papel OE 180 g/m².

La evidencia clave que entregan las gráficas de las Figuras 12, 13 y 14, y que ayuda al principal enfoque para la solución a la problemática, radica en la presencia de una tendencia a la baja en todas las curvas presentes en las gráficas de los distintos gramajes de Onda Encolado. Esta tendencia comienza en el tercer trimestre del año 2018, entre agosto y septiembre hasta el pasado mes de abril 2019, y que al observar las gráficas de las Figuras 6, 7 y 8, los meses de disminución de demanda catiónica en el proceso, coinciden con el aumento en consumo específico de aditivos químicos catiónicos como el Xelorex y ASA, en especial este último. La pregunta que se formula como resultado de lo descubierto sería ¿Qué es lo que está provocando la disminución de los valores de demanda catiónica del proceso, y en consecuencia el aumento del consumo de ASA?, la respuesta está relacionada con lo observado en aguas abajo del proceso, específicamente en el flujo de pasta de la bomba 15PU50 (ver proceso de producción en detalle en ANEXO I), ya que esta bomba recibe la pasta proveniente del *pulper* primario, en consecuencia, la problemática tiene relación directa con el ingreso de materias primas y aguas blancas en el proceso. Para que la pasta disminuya los niveles de demanda catiónica, significa que la materia prima ingresada es más “limpia”, lo que no aplicaría en el caso del cartón OCC que es el utilizado para la fabricación de los papeles onda encolado.

Finalmente, se identifica que la baja en los valores de la demanda catiónica de la bomba de 15PU50 corresponde a la utilización de aguas blancas, y específicamente a la recirculación de estas aguas, que son las aguas provenientes del bajo tela tanto del *back* y el *top*, mezcladas con otras aguas de proceso que son clarificadas y posteriormente recirculadas siendo usadas en el *pulper* primario para la generación de pasta. Esto como parte de un proyecto que tiene como objetivo disminuir los niveles de aguas blancas liberadas al mar, y reducir el consumo de agua fresca.

La justificación de esta teoría se basa en una saturación de componentes catiónicos en las aguas blancas, producto de las pérdidas de moléculas de ASA y Xelorex a través de los finos atrapados en las aguas bajo tela que retienen a los agentes químicos catiónicos por su alta área superficial. Al recircularse secuencialmente estas aguas, las moléculas de agentes químicos catiónicos se recirculan con estas, disminuyendo la carga negativa del sistema.

En consecuencia a lo anterior, las nuevas moléculas de los aditivos catiónicos ingresadas en el proceso poseen menos espacios libres para adherirse a las fibras, y debido a que tanto ASA como Xelorex comparten la misma carga, con una densidad carga mayor del último, las moléculas compiten entre sí para adherirse a las fibras, donde las remanentes terminan adhiriéndose hacia los finos y/o basura aniónica (*stickies*), lo que de no existir una buena retención, son filtradas junto a las moléculas sueltas de ASA o Xelorex sin poder enlazar, en el agua bajo tela, repitiéndose el ciclo y reduciendo nuevamente la demanda catiónica del proceso. Esto provoca que para obtener los valores de calidad de la prueba Cobb 120 se necesite agregar una mayor cantidad de ASA al proceso, provocando el sobreconsumo mencionado en el planteamiento del problema.

6.4 Propuestas de mejora a la problemática

Una posible solución a proponer, se basa en estabilizar la demanda catiónica del proceso reduciendo los consumos Xelorex a como máximo un 1 kg/ton en los gramajes altos, y complementar con uso de Percol también para la retención de finos, con consumos de menos de 1 kg/ton, y utilizar agentes de fijación como la Bentonita para mantener el *pitch* retenido en la formación de la hoja de papel y de esta manera no perder más encolado interno por fuga de finos y *pitch*, con el fin de mantener los valores de demanda catiónica de agua bajo tela en valores alrededor de 100 ± 20 $\mu\text{eq/L}$, hasta estabilizar la demanda catiónica del proceso.

A modo de complemento, se realizó un *troubleshooting* (o diagrama de decisiones) para los operadores de FPC Papeles, de tal manera que sepan actuar en circunstancias donde los valores de DCABT no estén dentro del rango de 100 ± 20 $\mu\text{eq/L}$, siguiendo un paso a paso, el cuál se muestra en la Figura 15. Aparte de las propuestas de dosificación mencionadas en el párrafo anterior, se destaca la utilización de sulfato de aluminio para cuando las magnitudes de las DCABT sean mayores a 120 $\mu\text{eq/L}$, con el fin de estabilizar la DCABT sin necesidad de adicionar Xelorex. Cabe destacar que el sulfato de aluminio es un coagulante que cumple una función similar al Xelorex, como se mencionó en la sección 3.3.2.

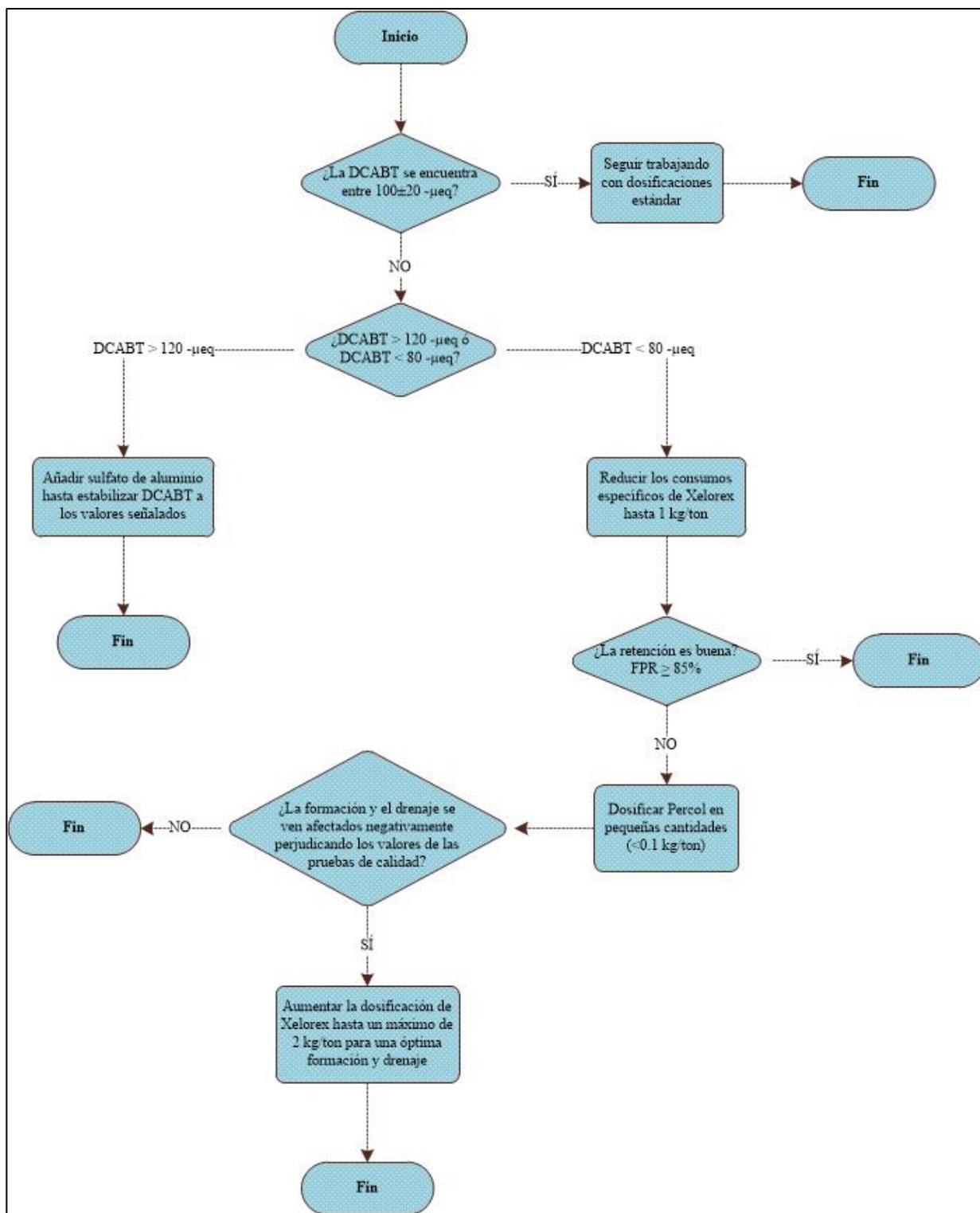


Figura 15. Diagrama de decisiones para mantener estable las DCABT en el proceso de producción de FPC Papeles.

Fuente: Elaboración propia.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Existen diferentes parámetros de proceso que determinan el consumo de ASA en la fabricación de papel, siendo la demanda catiónica el principal descubierto en esta investigación. Esto, debido a la recirculación de aguas blancas con contenido de restos de aditivos catiónicos tales como el mismo ASA y el Xelorex. Como consecuencia, se produjo un descenso de la demanda catiónica, afectando en la efectividad de ambos aditivos, y en consecuencia, provocando un aumento en sus consumos específicos para obtener un óptimo encolado. La demanda catiónica del sistema juega un papel fundamental en el encolado, debido a que de esto depende la adhesión del producto a las fibras de celulosa para entregar la propiedad de resistencia a la penetración de líquidos en el papel.

Otros parámetros determinantes en el consumo de ASA fueron la retención y el drenaje, debido a la alta reactividad de estas moléculas con los finos presentes en las suspensiones de fibras, de manera que un proceso de encolado eficiente involucra una óptima retención de finos, con una presencia mínima o inexistente en las aguas obtenidas del drenaje.

A modo de recomendación, se sugiere realizar pruebas con las indicaciones de la propuesta de mejora presentada en la discusión de resultados, durante un periodo de 1 a 2 meses para comprobar si se logra estabilizar la demanda catiónica del proceso, en conjunto con la búsqueda de alguna alternativa de tratamiento de aguas blancas para la recuperación o eliminación de los residuos catiónicos generados, de tal forma de complementar a las unidades de tratamiento de aguas blancas utilizadas actualmente en el proceso de FPC Papeles.

Adicionalmente se aconseja realizar un análisis de datos respecto a otras variables que podrían tener efecto en la efectividad del encolado, como el control de espuma, pH, etc. Finalmente se recomienda implementar mejoras en el proceso, como la adición de una nueva etapa de limpieza de las fibras recicladas, de manera de reducir al máximo el *pitch* y los *stickies*, y de esta manera consumir menos en aditivos químicos como Xelorex en el proceso.

8. REFERENCIAS

- Abril, A. & Mogollón, G. (2012). Química del papel. En: Reciclado celulósico (p. 147-192). Argentina: Miguel Zanuttini.
- Acebo-González, D., & Hernández-García, A. T. (2013). Los métodos Turbidimétricos y sus aplicaciones en las ciencias de la vida. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas*, 44(1).
- Bajpai, P. (2018). *Biermann's Handbook of Pulp and Paper* (3rd ed., pp. 77-94). San Diego: Elsevier.
- Clemo, D. (2018). *Manual de Consulta Forestal y Papelera Concepción*. (pp. 5-17).
- Biermann, C. (1996). *Handbook of pulping and papermaking* (2nd ed.). San Diego: Academic Press.
- Carnero, D. (2014). Gramaje, grosor y mano del papel - CEVAGRAF, SCCL. Recuperado de: <https://www.cevagraf.coop/blog/gramaje-grosor-mano-del-papel/>. (Accedido el 25/07/2019).
- CARTOPEL S.A.I. PROCESO DE FABRICACION DE PAPEL EN MOLINO CARTOPEL (pp. 1-3). Guayaquil, Ecuador: CARTOPEL. Recuperado de http://www.cartopel.com/ords/f?p=102:16:::P0_V_ID_IDIOMA_NR,P0_V_ID_PAGINA_NR,P0_V_ID_MENU_NR,P16_V_RST_YN:1,99,57,1. (Accedido el 17/05/2019).
- Chávez, E. (2019). Encolado del papel. Recuperado de https://www.academia.edu/36676382/Encolado_del_papel. (Accedido el 15/07/2019).
- Da Silva Campos, E. (2009). CURSO DE FABRICACIÓN DE PAPEL (pp. 4, 13). Recuperado de http://www.eucalyptus.com.br/artigos/41ood41/2009_Curso_Fabricacion_Papel.pdf. (Accedido el 22/05/2019).
- Fernández, G., García, F., Aparicio, F., & Sánchez, L. (2009). Moléculas anfífilas orgánicas: auto-ensamblajes con morfología y dimensionalidad moduladas. In *Anales de la Real Sociedad Española de Química* (No. 2, pp. 89-94). Real Sociedad Española de Química.

Forestal y Papelera Concepción (FPC) S.A. (2018). Presentación FPC (pp. 5-17). Concepción, Chile: FPC Papeles.

Gómez Puentes, N. A. (2005). Remoción de materia orgánica por coagulación-floculación (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia-Sede Manizales).

Leyton Pérez, J. T. (2017). Propuesta de degradación del retal de papel moneda y billetes fuera de circulación en la empresa control ambiental de Colombia Ltda (Bachelor's thesis, Fundación Universidad de América).

Marton, J. (1996). Dry-strength additives. In Paper Chemistry (pp. 83-97). Springer, Dordrecht.

McCarthy, W. R. & Stratton, R. A. (1987), Effects of Drying on Alkenyl Succinic Anhydride Esterification and Sizing, Tappi J., 70(12), 117.

Molina, L. (2007). ENCOLADO INTERNO DEL PAPEL: BREVE RESEÑA DE LA FÍSICA Y QUÍMICA DE LOS AGENTES ENCOLANTES MAS RELEVANTES EN LA ACTUALIDAD [Ebook] (pp. 3-6). Buenos Aires: Liliana Beatriz Molina Tirado. Recuperado de http://www.eucalyptus.com.br/artigos/07_RIADICYP_Taller_Parte+Humeda_Molina_2007.pdf. (Accedido el 15/07/2019).

Monte, M. C. (2000). Depósitos adherentes en el proceso de fabricación de papel reciclado (Doctoral dissertation, Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid (España)).

Novak, R. W. and Rende, D. S. (1993), Size Reversion in Alkaline Papermaking, Tappi J., 76(8),

Núñez, J. (1981). Meteorización. Fundamentos de Edafología (p. 41-45). San José, Universidad Estatal a distancia.

Paper Stock Grades for Green Recycling. (2019). Recuperado de <https://www.completerecycling.com/resources/paper-recycling/stock-grades>. (Accedido el 16/05/2019).

Rantala, T., Ojala, T., Nokelainen, J., Kumpulainen, H., & VanPembrook, K. (2002). Wet end management concept: key measurements for control solutions in one analyser platform. Pulp & paper Canada.

- Rivera, N. A. (2004). Importancia, manejo y control de extraíbles e incrustaciones (pitch) en la fabricación de papel. *Madera y Bosques*, 10(1), 89-99.
- Roberts, J. C. (1996), Neural and alkaline sizing. In: *Paper Chemistry*. Roberts J. C. (ed.), Glasgow, Blackie Academic & Professional, ISBN 0 7514 0236 2, pp. 140-160.
- Samyn, P., & Barhoum, A. (2018). Engineered nanomaterials for papermaking industry. In *Fundamentals of Nanoparticles* (pp. 245-277). Elsevier.
- Sappi Idea Exchange. (2003). The Paper Making Process From wood to coated paper (p. 11). Recuperado de <http://materijali.grf.unizg.hr/media/PaperMakingProcess.pdf>. (Accedido el 22/05/2019).
- Sjostrom, J. & Holmbom, B.: "A scheme for chemical characterization of deposits in pulp and paper production". *Papen ja Puu - Paper and Timber*, no 2. Febrero, 1988. p. 152-156.
- Seppänen, R. (2007). On the internal sizing mechanisms of paper with AKD and ASA related to surface chemistry, wettability and friction (Doctoral dissertation, KTH).
- Soto, M. (2018). Informe de fotos FPC (pp. 10-42). Concepción, Chile.
- TAPPI Press. (1999). "Freeness of pulp (Canadian standard method)", TAPPI T227 om 99, Atlanta, GA.
- Wasser, R. B. (1987), Reactivity of Alkenyl Succinic Anhydride: Its Pertinence with Respect to Alkaline Sizing, *J. Pulp Paper Sci.*, 13(1), 29.
- Wasser, R. B. & Brinen, J. S. (1998), Effect of hydrolyzed ASA on sizing in calcium carbonate filled paper, *Tappi J.*, 81(7), 139.

ANEXOS

ANEXO I

Descripción en detalle de proceso de Producción de FPC Papeles

Preparación de pasta

Para iniciar la preparación de la pasta, se selecciona la materia prima a utilizar (DKL, OCC, etc.), dependiendo de los requerimientos de producción, luego esta es trasladada en un transportador de fardos a través de la Línea 1 (Línea principal) ó de la Línea 2 (Línea secundaria que procesa material limpio, principalmente DKL y celulosa blanqueada), para ser alimentada al *pulper* primario 15E200. Este último es utilizado para la transformación de la materia prima en pasta, mediante la mezcla de esta con agua, para poder lograr la disgregación de las fibras por la acción del movimiento de la hélice, este proceso se ejecuta hasta lograr un máximo nivel de consistencia de la pasta para posteriormente ser bombeada (15PU-50) al estanque de almacenamiento (Soto, 2015). De manera paralela al proceso anterior, opera un equipo llamado *Ragger*, el cual está conectado al *pulper* y consiste en una cadena que se extrae lentamente durante un largo periodo de tiempo (probablemente 1 metro cada unas cuantas horas (Biermann, 1996).



Figura 161. *Pulper* primario 15E200 en operación FPC Papeles.

Fuente: FPC Papeles S.A. 2015.



Figura 172. *Ragger* 15E204 en operación FPC Papeles.

Fuente: FPC Papeles S.A. 2015.

El *ragger* 15E204 se encarga de quitar los restos de plástico, grapas metálicas, alambres, materiales fibrosos, cintas, papeles resistentes a la humedad, basura y demás materiales largos que lo envuelven a medida que va girando en el interior del *pulper*, estos desechos finalmente son enviados a una prensa enfardadora para luego ser desechados (Soto, 2015).

La pasta emergente del *pulper* primario 15E200 con una consistencia de 4 – 4,5%, es recepcionada por dos *pulpers* secundarios (15E201 y 15E215) en serie en donde se procesa y se limpia quitando los restos de plásticos presentes para no interferir en la producción, el rechazo de la pasta proveniente de estos dos *pulpers* es enviado a un tambor de rechazos (15E202), el cual se encarga de recuperar la fibra contenida en este y enviarla nuevamente al *pulper* primario, el rechazo del tambor es enviado a la prensa enfardadora juntos a los desechos del *ragger*. El aceptado de pasta saliente de los *pulpers* secundarios posee una consistencia de 2,5 % y es bombeado hacia un estanque de almacenamiento (15C09). Finalmente, la pasta contenida en el estanque es bombeada (15PU-34) para alimentar a los *cleaners* o limpiadores centrífugos (15E205 y 15E206), que se encargan de eliminar pequeños residuos pesados, como arena, vidrio y fragmentos de metal de la pulpa mediante aceleración centrífuga, a través de un flujo de entrada tangencial que hace que se forme un vórtice en el interior del *cleaner*; las partículas pesadas se mueven hacia el exterior del vórtice y, finalmente, caen al fondo del limpiador con los rechazos, mientras que la pulpa acepta el movimiento hacia el centro del vórtice, donde se eliminan a una presión más baja (Biermann, 1996).



Figura 183. Tambor de rechazos (15E202) FPC Papeles.

Fuente: FPC Papeles S.A. 2015.



Figura 194. Limpiadores centrífugos o *cleaners* (15E205 y 15E206) FPC Papeles.

Fuente: FPC Papeles S.A. 2015.

Refinación y acondicionamiento

En el proceso de refinación se realiza un tratamiento mecánico a las fibras, haciendo pasar a la suspensión por distintos depuradores y/o cribado para obtener mejores propiedades en el papel, como la fibrilación o “peinado” y el corte, con el objeto de adaptarlas mejor para la formación sobre la máquina de papel (Biermann, 1996).

El aceptado de los *cleaners* el cual posee una consistencia del 2,5 % es recibido por el depurador primario grueso 15E207 o también llamado fraccionador, el cual se encarga de separar las fibras según su tipo (longitud) larga o cortas. El aceptado de las fibras cortas es enviado directo hacia 3 espesadores de fibra corta (15E66, 15E67 y 15E68) dando una consistencia final de 4,5% descargándola hacia el estanque de fibra corta 15C07-2. Por otro lado, el rechazo del fraccionador 15E207 es recibido por el *cleaner* de alta densidad 15E208, que se encarga de eliminar compuestos indeseables presentes en el rechazo (mediante el mismo principio de funcionamiento de los *cleaners* mencionados anteriormente), con el fin de alimentar al depurador grueso secundario 15E209, donde el aceptado de este último es enviado nuevamente al depurador grueso primario 15E207, a través de la bomba 15PU34. En cambio, el rechazo del depurador grueso secundario es enviado hacia el carro de rechazo (Soto, 2015).



Figura 205. Depurador grueso primario (15E207), depurador grueso secundario (15E209) y depuradores finos (15E56, 15E57 y 15E73) FPC Papeles.

Fuente: FPC Papeles S.A. 2015.

El aceptado de fibra larga del depurador primario grueso 15E207, es enviado a través de la bomba 15PU06 hacia el depurador fino primario 15E56, el aceptado de este es dirigido hacia los 3 espesadores de fibra larga, y posteriormente se envía la pasta al estanque de fibra larga 15C07-1, y el agua filtrada de los espesadores es llevada al estanque de agua principal 15C10. El rechazo del depurador fino primario alimenta a los depuradores 15E57 o 15E73, donde el rechazo de estos es succionado por la bomba 15PU07 y diluido con agua succionada del estanque 15C04, logrando una consistencia de 1,0 % en la pasta y siendo enviada al *cleaner* de alta densidad 15E107, este último alimenta al depurador fino terciario 15E210. El aceptado es enviado al depurador fino primario 15E56, y el rechazo es enviado al tamiz inclinado 15E106, donde en este equipo los sólidos separados del agua terminan en un carro recolector, y el agua es recirculada al circuito de depuración fina terciaria (Soto, 2015).



Figura 216. Espesadores de fibra corta y fibra larga FPC Papeles.

Fuente: FPC Papeles S.A. 2015.

Las pastas almacenadas en los estanques 15C07-1 y 15C07-2 son enviadas hacia los refinadores, los que cumplen la función de adelgazar y juntar las fibras para obtener mayor calidad en el papel. Tras el proceso de refinación, las fibras se pliegan y aumentan su superficie, aumentando el aglomerado de las fibras, para ser enviadas al estanque 25C21 en el cual son mezcladas y almacenadas (Soto, 2015). Esta mezcla es enviada (bomba 25PU02) a la prensa de doble tela 15E125, que se encarga de extraer el agua de la pasta, aumentando su consistencia en un 20% aproximadamente. El agua filtrada en este proceso es recuperada y enviada hacia el estanque 15C10 (Soto, 2015).



Figura 227. Refinadores de fibra FPC Papeles.

Fuente: FPC Papeles S.A. 2015.



Figura 238. Prensa de doble tela (15E125) FPC Papeles.

Fuente: FPC Papeles S.A. 2015.

Máquina Papelera

La máquina papelera es un equipo que cumple la función de formar, deshidratar, prensar y secar continuamente una suspensión de fibras de papel. Existen diferentes tipos de máquinas de papel, siendo las más utilizadas, las de extremo húmedo con mesa formadora *fourdrinier*, donde se aplica una suspensión diluida de fibras (típicamente con una consistencia de 0.3-0.6%) a una malla de alambre sin fin o tela de plástico) (Biermann, 1996). La máquina de papel de FPC consiste en una máquina mixta de formación, ya que posee 2 mesas planas de formación *fourdrinier*, una por línea *Top* la cual se encuentra en la parte superior, y otra por la línea *Back* en la parte inferior, ambas se juntan en un punto de unión (Soto, 2015).



Figura 249. Mesas formadoras fourdrinier de líneas Back y Top de máquina papelera FPC Papeles.

Fuente: FPC Papeles S.A. 2015.

Para la formación del papel la pasta debe pasar por diferentes sectores de la máquina papelera para llegar a su forma final, estos sectores se describen a continuación:

Caja de entrada

La caja de entrada es un aparato que está ubicado previo a la mesa formadora, que se encarga de transformar el flujo circular de pasta proveniente de la bomba de dilución con una consistencia menor a 1%, en un flujo rectangular coincidente con el ancho de la máquina de papel, al tiempo que le entrega una velocidad igual o aproximada a la velocidad de la tela de la mesa formadora (Da Silva, 2009). Esta operación es de gran importancia, debido a que la forma y uniformidad del papel dependerán de una dispersión uniforme de las fibras como de otros constituyentes del papel. Por lo tanto, la caja de entrada cumple con diferentes funciones tales como, extender la pasta de manera uniforme e igualar los flujos y la consistencia a lo largo de la mesa formadora, proporcionar un gradiente de velocidad de la pasta uniforme a lo largo de la máquina de papel, crear una turbulencia adecuada para evitar la generación de floculación de las fibras y la descarga de un flujo constante de pasta y con el ángulo correcto sobre la mesa formadora (Da Silva, 2009). En FPC papeles existen dos cajas, la presente en la parte superior de la máquina (línea *Top*) y la de la parte inferior (línea *Back*).

Mesa de formación

La formación de la hoja de papel se desarrolla en la mesa formadora a través de un proceso de filtración, luego de recibir el chorro de la suspensión de fibras procedente de la caja de entrada sobre el soporte de formación, el cual está constituido por una tela de material metálico o sintético que posee una luz de malla del mismo orden de magnitud que la longitud de las fibras utilizadas. A partir de esto se genera la filtración del agua contenida en la suspensión, primero por efecto de gravedad y luego por la generación de presión de vacío en el seno de la suspensión fibrosa hasta conseguir una estructura formada por fibras entrelazadas, compactas y con un grado de humedad lo suficientemente bajo como para permitir el paso de la hoja de papel formada a la operación siguiente, que se produce en las prensas, donde se continúa eliminando humedad (Da Silva, 2009). La sección de tela disminuye el contenido de humedad del 99 al 85-80% (SCA Publication Papers, 2015).

Prensado

La sección de prensado consiste en reducir el contenido de humedad de la hoja formada mediante drenaje y compresión, a través del paso por una serie de rodillos giratorios los cuales ejercen una presión mecánica determinada entre ellos en conjunto a un fieltro absorbente presente entre ambos, por donde la hoja de papel se sujeta entre las capas de fieltro absorbente al pasar por entre los rodillos (Sappi Idea Exchange, 2003). En esta operación, parte del agua del papel pasa al fieltro desde donde se extrae por vacío antes de volver a encontrarse con la hoja de papel. Al finalizar el proceso de prensado, la hoja de papel llega a alcanzar aproximadamente una humedad del orden del 50-60% (Da Silva, 2009). De esta manera también como consecuencia del proceso, se logra compactar las fibras de celulosa para incrementar la resistencia del papel mediante la presión ejercida por las prensas (CARTOPEL S.A.I., n.d.). La sección de prensado de la máquina papelería de FPC consiste en 2 prensas, la primera corresponde a la prensa *Hergen*, la cual opera a menor presión, y la prensa *Zapata*, la cual opera a una mayor presión. Desde el punto de vista de económico, la operación de prensado es importante por su bajo costo en comparación con los costos asociados con la eliminación del agua en la sección de secado (Da Silva, 2009).

Secado

En la sección de secado se elimina el agua remanente presente en la hoja de papel por evaporación, para reducir el contenido de humedad hasta un valor definitivo de 8% aproximadamente. Para lograr este objetivo, la hoja de papel se pone en contacto con una serie de cilindros calentados interiormente con vapor. Los cilindros están dispuestos de modo de contactar primero con un lado del papel y luego con el otro para asegurar una deshidratación homogénea (SCA Publication Papers, 2015). En el proceso se generan condensados de vapor, los cuales es necesario extraer para evitar problemas en la operación (Soto, 2015).

Scanner

Una vez finalizado el proceso de secado, el papel debe pasar por un scanner ubicado a la salida de los secadores, esto suministra información del perfil del papel en gramaje y contenido de humedad, lo que permite el monitoreo de calidad del papel saliente y la retroalimentación de la entrada de pasta para mantener control de los perfiles de alta calidad (FPC S.A., 2018).

Pope

El papel fabricado es enrollado en un eje de acero llamado “Pope” para formar el “jumbo”, “tambor” o “bobina madre” final (FPC S.A., 2018).

Bobinado y cortado

Finalmente, el “tambor” de papel es desenrollado y cortado en diferentes medidas según el formato solicitado por el cliente, para luego estos cortes ser enrollados nuevamente en la máquina bobinadora, para formar bobinas más pequeñas con diámetros y anchos determinados. Una vez vendido el producto, la bobina de papel es cortada para la obtención de una serie de formatos de pliegos de cierta medida para ser utilizado por el cliente (Soto, 2015).



Figura 2510. Bobinadora individual FPC Papeles.

Fuente: FPC Papeles S.A. 2015.

ANEXO II

Adición de químicos en el proceso de FPC Papeles

A continuación, se muestra los diagramas de flujo de ingreso de químicos en el proceso de FPC Papeles, para la preparación de mezclas de las cajas de entrada del Top y Back.

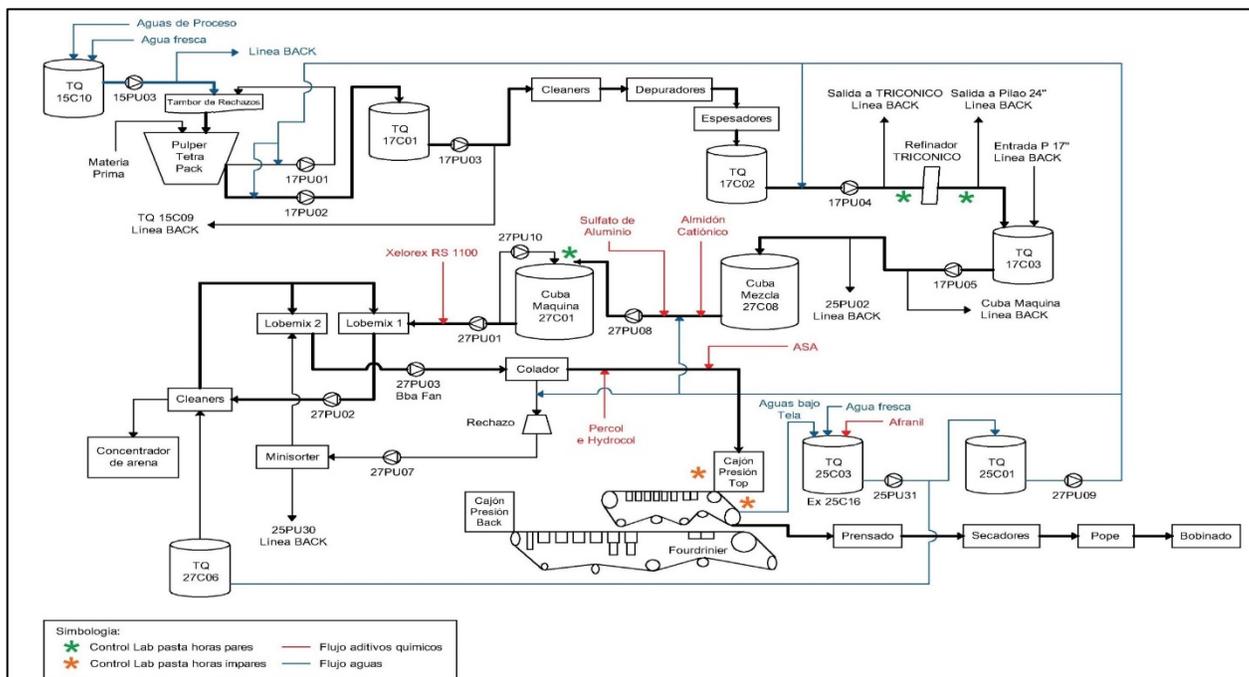


Figura 2611. Diagrama de bloques del proceso de producción de FPC Papeles Línea Top.

Fuente: Elaboración propia.

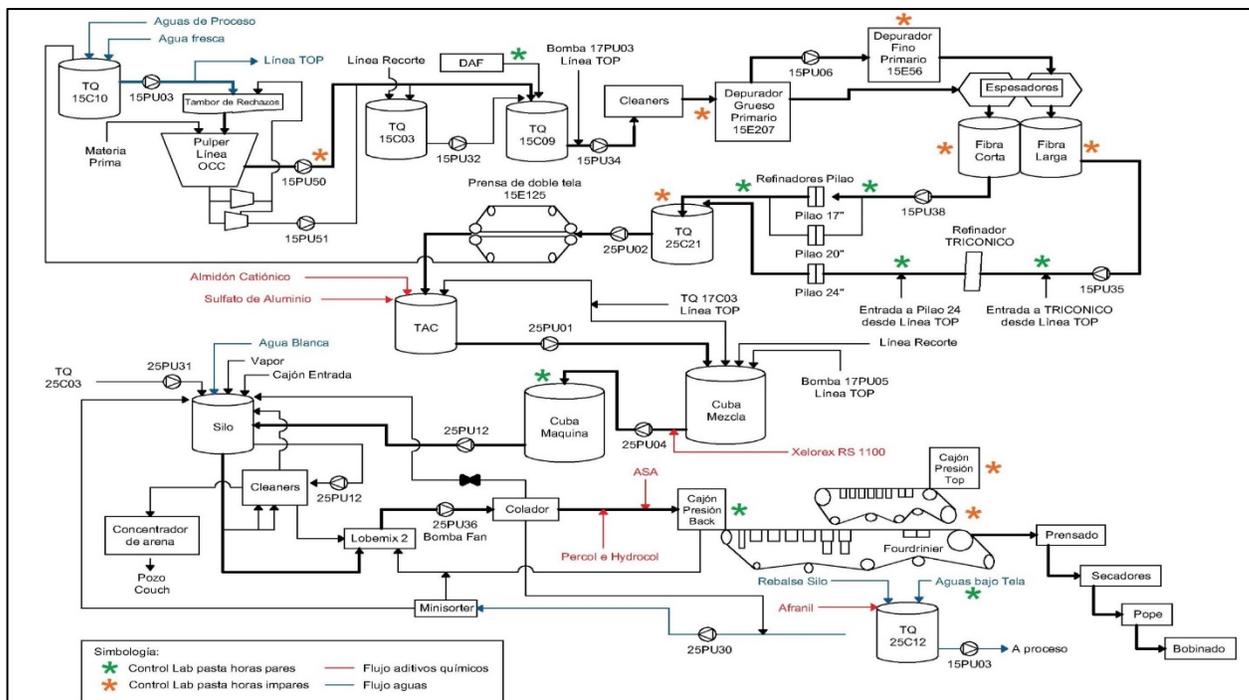


Figura 2712. Diagrama de bloques del proceso de producción de FPC Papeles Línea Back.

Fuente: Elaboración propia.

Consideraciones en la adición de aditivos químicos en la fabricación de papel

Dimensionamiento de área superficial de fibras y finos

Tabla A1. Área superficial relativa de fibras y fragmentos de fibra.

Fuente: (Bajpai, 2018).

Fiber or Fine Dimensions (Box-Shape)	Gross Outer Surface Area (m ² /g)	Relative Surface Area
4000 μm × 40 μm × 40 μm	0.100	1.00
1000 μm × 10 μm × 10 μm	0.402	4.02
40 μm × 40 μm × 40 μm	0.150	1.49
10 μm × 10 μm × 10 μm	0.600	5.97
100 μm × 2 μm × 2 μm	2.020	20.10

Estructura química de aditivos de retención y drenaje

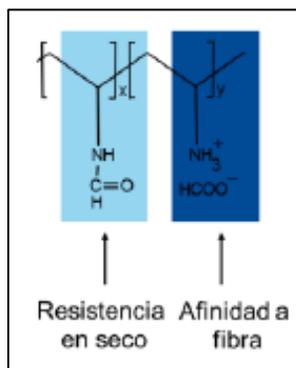


Figura 2813. Estructura química de coagulantes de Polivinilaminas. Xelorex RS1100, 1200 y 1300.

Fuente: (Clemo, 2018).

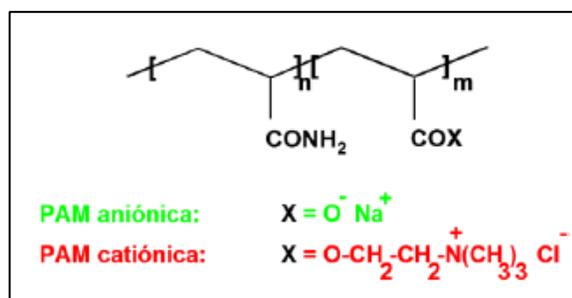


Figura 2914. Estructura química de floculantes de Poli(acrilamida) (PAM) Aniónica y Catiónica. Productos Percol 3035, Percol 63, etc.

Fuente: (Clemo, 2018).

Mecanismos de floculación

Mecanismo Puente:

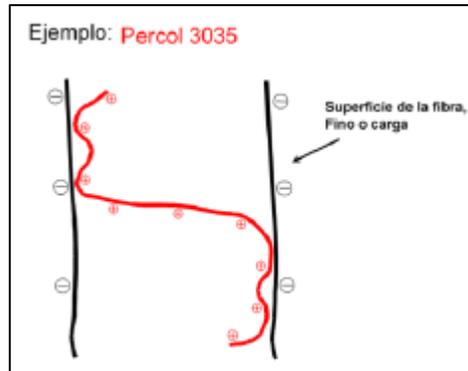


Figura 3015. Representación de mecanismo puente de Percol 3035.

Fuente: (Clemo, 2018).

La densidad de carga de las poliacrilamidas catiónicas permite su adsorción en la superficie de las fibras (carga aniónica), sin carga no habría adsorción y una carga excesiva dejaría a la molécula inactiva sobre la superficie de la fibra (Clemo, 2018).

Mecanismo de Parche:

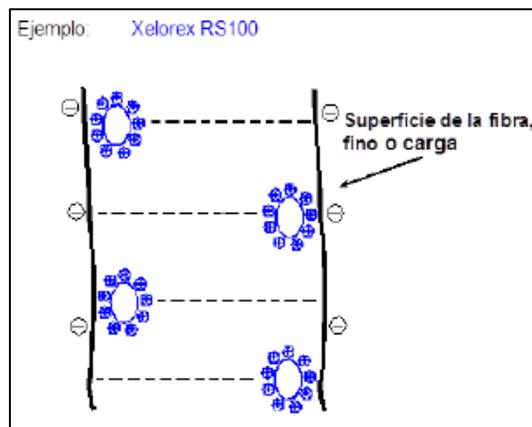


Figura 3116. Representación de mecanismo parche de Xelorex RS1100.

Fuente: (Clemo, 2018).

Dosificación de aditivos de retención y drenaje

Existen moléculas cuyo comportamiento cabe dentro de los denominados coagulantes, sin embargo, son desarrolladas para entregar adicionalmente propiedades extras, como es el caso de la línea Xelorex, cuya molécula entrega un tipo de enlace a la fibra de mayor fuerza, haciendo de esta una característica de resistencia (Clemo, 2018). Este tipo de molécula permite de acuerdo con la dosis utilizada, obtener distintos efectos, como se muestra en el diagrama siguiente:

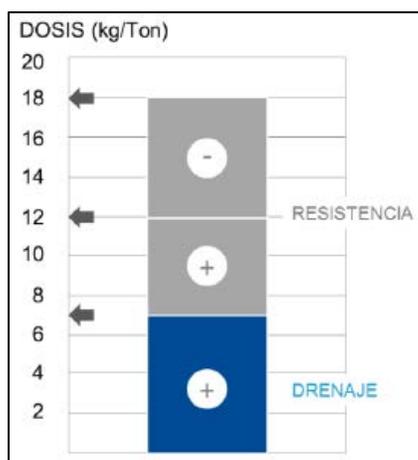


Figura 3217. Diagrama de efectos entregados en la producción de papel según dosificación de coagulante.

Fuente: (Clemo, 2018).

En sistemas fibrosos no es recomendable agregar sobre 6 a 8 kg/ton de coagulantes catiónicos como Xelorex RS1100 debido a su alta carga. Como controlador de la carga catiónica se utiliza Xelorex B2000 (poliacrilamida aniónica), cuya molécula posee una carga neta negativa haciendo posible trabajar en demandas catiónicas de -20 mEq/L e inferiores (Clemo, 2018).

Lo anterior se explica por medio de las medidas electroquímicas en la producción de papel en el extremo húmedo de la planta, donde se mide constantemente la demanda de carga y se llevan a cabo correctivos en el momento de la dosificación de químicos catiónicos, llegando a disminuir el consumo de coagulantes y así evitar que en el transcurso del proceso sature la fibra y cause problemas en la producción de papel. Por lo que no existe una dosificación óptima si no que varía respecto a los requerimientos del proceso (Clemo, 2018).

Aspectos importantes en el uso de ASA para la fabricación de papel

Hidrólisis de ASA

Como anhídrido, el ASA reacciona de manera fácil con el agua (Wasser, 1987). La hidrólisis de ASA es acelerada con el pH, el tiempo y la temperatura (McCarthy & Stratton, 1987). La hidrólisis de ASA se produce en el límite de aceite / agua, ya que el propio ASA es insoluble en agua. Debido a su naturaleza anfipática, el ácido-ASA puede reducir la tensión superficial de líquidos polares, como el agua, y así también disminuir la eficiencia de encolado (Novak & Rende, 1993). Por otro lado, cuando el ácido-ASA forma un complejo con iones de calcio, se forma un producto hidrofóbico (Wasser & Brinen 1998). La Figura A18 muestra las reacciones asumidas de ASA.

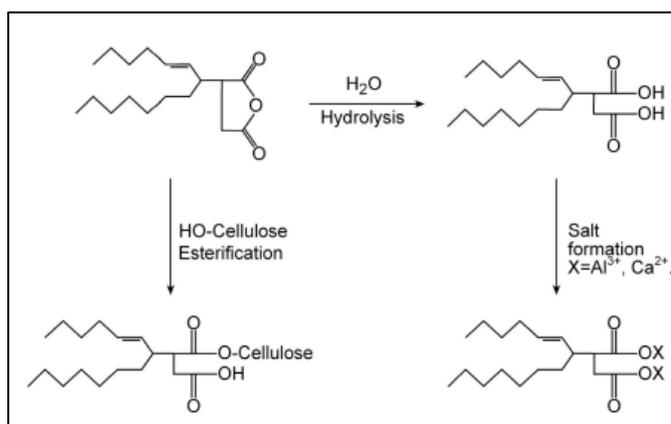


Figura 3318. Reacción de ASA con agua, formación de ácido dicarboxílico (ácido alquenil succínico) y formación de sal.

Fuente: (Seppänen, 2007).

El ácido dicarboxílico producto de la hidrólisis de ASA puede mantenerse en la emulsión por un tiempo, pero luego se disuelve en las aguas blancas, combinándose con los cationes presentes en estas (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cu^{2+}) formando compuestos insolubles (depósitos por hidrólisis) que afectan a la velocidad de máquina. Para limitar la hidrólisis del ASA, se recomienda bajar el pH por agregado de sulfato de aluminio (Molina, 2007).

Teoría y Precauciones del Encolado con ASA:

El ASA se enlaza los grupos hidroxilo de la celulosa por esterificación, y con el fin de facilitar esta unión y brindar protección a la molécula de ASA, se utiliza ampliamente el almidón catiónico o cualquier polímero catiónico usado en la emulsificación que entregue atracción adicional y enlace iónico a la fibra (Clemo, 2018).

Mejorando la retención de los finos se aumenta el enlace del ASA con la estructura de la celulosa. Debemos considerar que ASA es altamente reactivo con agua. Por lo que, para proteger la molécula de ASA de la hidrólisis, esta es emulsionada en una turbina junto con almidón catiónico (Luderur 30), en la siguiente figura se visualiza como termina la molécula de ASA (Clemo, 2018):

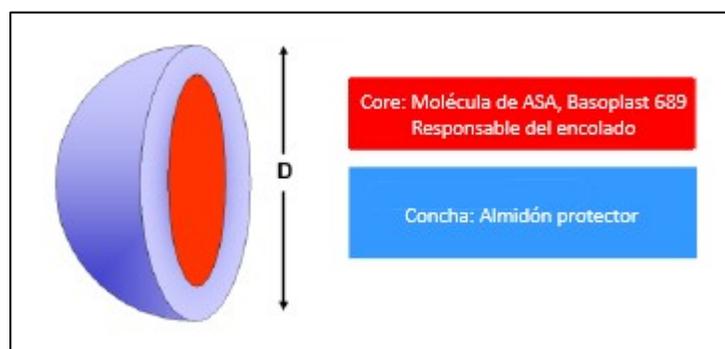


Figura 3419. Representación interacción molécula de ASA con almidón catiónico.

Fuente: (Clemo, 2018).

Las precauciones se relacionan con los siguientes aspectos:

1. Temperatura de curado: La temperatura mínima de secado debe ser superior a 120°C, de tal forma, que la reacción de encolado se detenga por completo a la salida de pope (Clemo, 2018).
2. pH de Emulsión: Para evitar la hidrólisis y los depósitos generados como consecuencia de esta, el pH de la emulsión de ASA debe ser inferior a 6, siendo óptimo cercano a 5, como se muestra en la siguiente figura (Clemo, 2018):

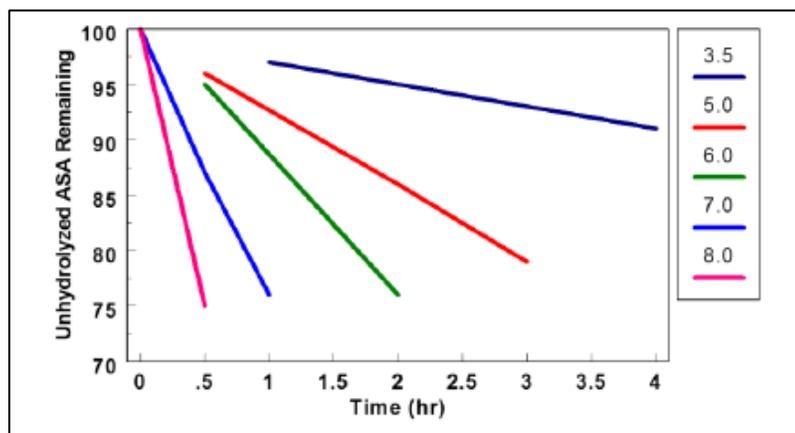


Figura 3520. Comportamiento en el tiempo del % restante de ASA no hidrolizado en función del pH de la emulsión.

Fuente: (Clemo, 2018).

Para controlar pH en la preparación de ASA se utiliza Sulfato de Aluminio, lo que otorga mayor estabilidad a la emulsión y previene el hidrolizado. Un exceso de Sulfato de Aluminio reduce la eficiencia del encolado (Clemo, 2018).

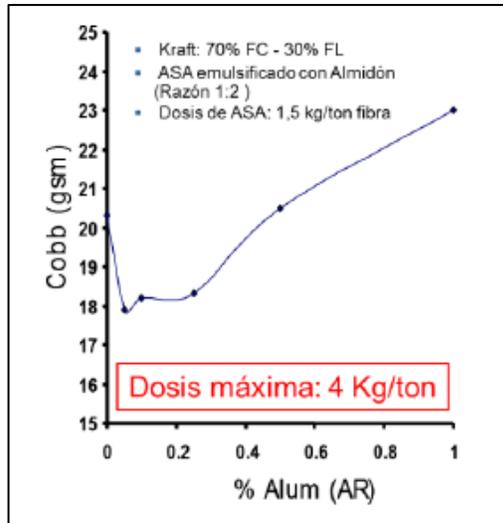


Figura 3621. Comportamiento de los valores de la prueba Cobb respecto a la dosificación de sulfato de aluminio en el sistema.

Fuente: (Clemo, 2018).

3. Temperatura de Preparación: Igualmente, la temperatura actúa como un agente de hidrólisis de la molécula de ASA y por consiguiente debemos mantener una baja temperatura de preparación, como muestra la figura siguiente:

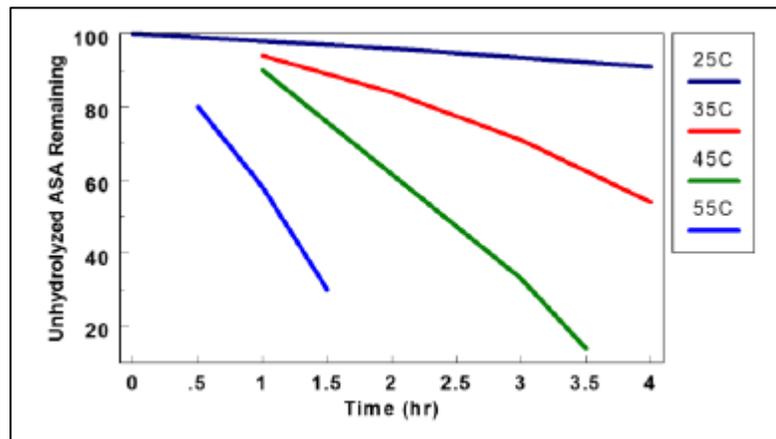


Figura 3722. Comportamiento en el tiempo del % restante de ASA no hidrolizado en función de la temperatura de la emulsión.

Fuente: (Clemo, 2018).

Fijación y/o Control de Pitch & Stickies:

Al igual que en el procedimiento de Retención y Drenaje, utilizamos para controlar el *Pitch* o basura aniónica, un proceso de neutralización de cargas. Dentro de los objetivos de la fijación de *pitch* & *stickies* encontramos: Fijar coloides y disolver sustancias perjudiciales, control de carga, obtener el máximo efecto de procesos químicos, limpieza de los circuitos de agua, limpieza de la máquina de papel, mejorar la calidad del papel, mejorar la operación de la máquina de papel y facilitar el tratamiento de las aguas blancas (Clemo, 2018).

Neutralización

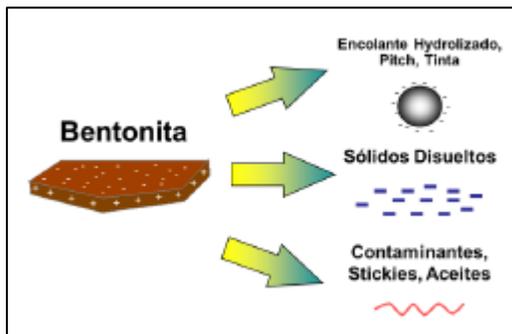


Figura 3823. Representación de agente de fijación y contaminantes (basura aniónica).

Fuente: (Clemo, 2018).

La basura aniónica, se presenta como una suspensión coloidal en el material reciclado, que se debe fijar a la fibra y retirar del proceso para impedir su depósito en cubas, bombas, zonas de cizalle, zonas de vacío, etc. (Clemo, 2018).

Mecanismo de Fijación para Componentes de Basura aniónica:

1er. paso: Formación de Complejo con Hydrocol CH, Bentonita:

En agua, el complejo de bentonita adopta una gran cantidad de cargas negativas sobre las caras y un número de cargas catiónicas menor en los bordes. La bentonita posee una carga aniónica típica de 0.6 meq/g (Clemo, 2018).

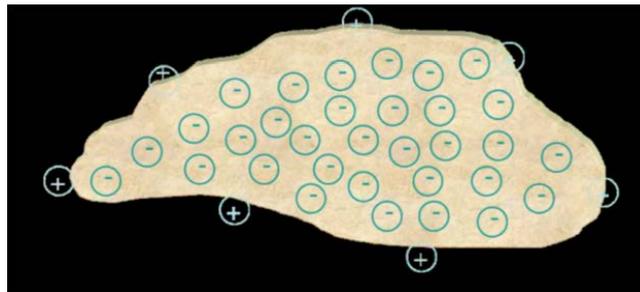


Figura 3924. Representación de complejo de bentonita cargado.

Fuente: (Clemo, 2018).

2°. Paso: Fijación a la Fibra vía retención de finos o con adición de coagulantes:

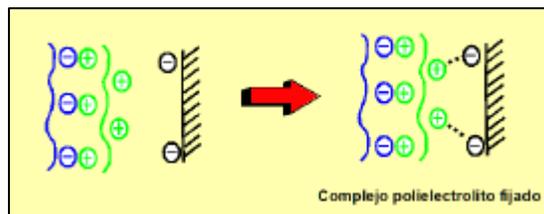


Figura 4025. Representación de fijación de complejo polielectrolito de bentonita a la fibra.

Fuente: (Clemo, 2018).