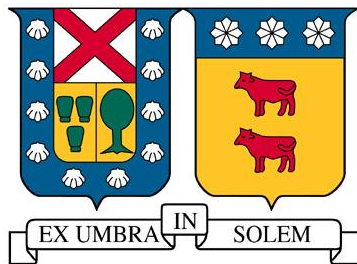


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL
VALPARAÍSO – CHILE



**“ANÁLISIS DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CELULOSA
PARA EL ENSUCIAMIENTO PREMATURO DE CONCENTRADORES”**

RAÚL ANTONIO YÁÑEZ SALAZAR

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
CIVIL QUÍMICO**

PROFESOR GUÍA

DANIEL RAMÍREZ LIVINGSTON

INGENIERO CORREFERENTE

ENRIQUE PONCE SOTO

MARZO 2017

Agradecimientos

A mis padres, hermana y todas las personas que me apoyaran en esta larga travesía.

Mención especial para mis entrañables amigos con los cuales compartí gran parte de mi vida universitaria, en la famosa “casa estudio”. Para Ángel, Tuto y Cal.

Para pedro que fue gran sostén en la realización de mi memoria, desde principio a fin.

Finalmente a mí querida Polola Lissette, que estuvo conmigo en la parte final de mi carrera.

Resumen ejecutivo

La recuperación de reactivos es fundamental para que el negocio tenga viabilidad económica y, además, sea amigable con el medio ambiente. En esta línea, Planta evaporadores, que pertenece al área de recuperación, ha tenido, históricamente, problemas de ensuciamiento en sus equipos de evaporación de agua presente en el licor negro, es decir, evaporadores (primera etapa de evaporación) y concentradores (etapa final de evaporación). En esta memoria, se analizaron diversas posibles causas que provocarían el fenómeno de ensuciamiento, catalogándolas en causas que provocan efecto inmediato de carácter prolongado en el tiempo, efecto inmediato de carácter no prolongado en el tiempo o también denominada de carácter puntual y, finalmente, aquellas que no afectan al proceso normal de evaporación. Gran parte de lo contrastado, en Planta Constitución, con la bibliografía estudiada, tuvo nulo impacto en evaporadores, es decir, la cantidad de fibra en el licor negro, el análisis granulométrico de las astillas, la eficiencia de separación jabón-licor, no provocan efecto en evaporadores. Por otro lado, la Causticidad sólo tendría un efecto puntual, en otras palabras, efecto inmediato no prolongado en el tiempo. Ahora bien, la principal hipótesis estudiada relacionada a la precipitación de sales de sodio, sí tendría efecto en evaporadores y sería de carácter prolongado en el tiempo, siendo, a priori, el agente causante de la problemática en planta evaporadores. Para conocer el origen del ensuciamiento, se estudió la influencia de procesar madera con data de almacenamiento prolongado, teniendo influencia en evaporadores cuando la data de almacenamiento era igual o superior a 15 semanas promedio, este fenómeno se obtuvo tanto para el año 2015, como también el año 2016.

Finalmente, ante la dificultad de rotar el inventario (madera) con mayor rapidez, debido a la envergadura de Planta Constitución, se analizó la viabilidad de realizar un estudio económico basado a realizar mejoras en planta evaporadores, con la finalidad de aumentar su capacidad y que, por otro lado, el fenómeno que causa en evaporadores procesar madera de distintas datas de almacenamiento sea mínimo. La inversión estimada es de aproximadamente 10.000[kUSD] y el beneficio alcanzaría un valor aproximado de 1.500 [kUSD/año]. Por otro lado, el valor actual neto (VAN) sería de 193 [kUSD], la correspondiente tasa de descuento (td) de 9%, y una tasa interna de retorno (TIR) de 9,3%.

Glosario

CNCG	Son los correspondiente gases no condensables concentrados, subproductos de la cocción.
DNCG	Son los correspondientes gases no condensables diluidos, generados en gran medida en estanque de planta caustificación.
Vahos	Gases generados en el proceso kraft, estos engloban tanto los CNCG como los DNGC.
Factor Ensuciamiento	Es el factor que indica el grado ensuciamiento y mide la diferencia de temperatura entre el vapor de entrada al concentrador y el licor de salida. Mayor diferencia indica mayor ensuciamiento.
LNC	Licor negro concentrado.
Fouling	Fenómeno de ensuciamiento, principalmente, por adhesión de cristales suaves y de fácil remoción.
Scaling	Fenómeno de ensuciamiento, pero con características de adhesión de cristales en la superficie de transferencia de calor de carácter duro y de difícil remoción.
Lamela	Estructura similar a un intercambiador de placa, pero con flujo en sentido longitudinal.

Índice

Agradecimientos	2
Resumen ejecutivo	3
Glosario	4
Índice.....	5
Introducción	8
1. Antecedentes.....	9
1.1 Descripción de la empresa	9
1.2 Ubicación de la empresa	10
1.3 Materias primas requeridas por el proceso	11
1.4 Productos elaborados por el proceso	13
1.5 Proceso de sulfato	14
1.5.1 Área Fibra	14
1.5.1.1 Área preparación madera	14
1.5.1.2 Área digestores	15
1.5.1.3 Área lavado y clasificación.....	15
1.5.1.4 Área de secado y línea final	15
1.5.2 Área de recuperación y energía	16
1.5.2.1 Área desmineralizado	16
1.5.2.2 Área evaporadores	16
1.5.2.3 Área caustificación	16
1.5.2.4 Área Horno de cal	17
1.5.2.5 Área planta de agua.....	17
1.5.2.6 Área caldera de poder	17
1.5.2.7 Área caldera recuperadora	17
1.5.2.8 Área de generación de energía.....	18
2. Objetivos.....	20
2.1 Objetivos Generales.....	20
2.2 Objetivos Específicos	20
3. Evaporación.....	21

3.1	Aplicaciones de los evaporadores.....	22
3.2	Tipo de evaporadores.....	23
3.2.1	Evaporadores de Película Ascendente (<i>Rising Film</i>)	24
3.2.2.	Evaporadores de Película Descendente (<i>Falling Film</i>).....	25
4.	Alcances de la Unidad Evaporadores Planta Constitución.....	27
4.1	Bases de diseño	29
4.1.1	Especificaciones de alimentación.....	29
4.1.1.1	Composición química y propiedades.....	29
4.1.1.2	Propiedades físicas	31
4.1.1.3	Contenidos de sólidos secos	31
4.1.1.4	Viscosidad	32
4.1.1.5	Masa específica o densidad	33
4.1.1.6	Calor específico	33
4.1.1.7	Conductividad Térmica	34
4.1.1.8	Coeficiente de convección del licor negro	34
4.1.1.9	Aumento del punto de ebullición (BPR)	34
5.	Descripción del proceso de concentración de licor	35
5.1	Flujo de licor.....	36
5.2	Flujo de vapor y vahos.....	37
5.3	Flujo de condensados limpios.....	37
5.4	Flujos de Condensados Combinados	38
5.5	Flujo de Agua Industrial	38
5.6	Columna de agotamiento (Stripper).....	39
5.7	Listado de equipos Área evaporadores	42
5.8	Criterios de disponibilidad del proceso	43
6.	Problemática a estudiar.....	44
6.1	Antecedentes	44
6.2	Pérdidas de capacidad de evaporación.....	45
6.2.1	Problemas de ensuciamiento en evaporadores.	45
6.2.1.1	Ensuciamiento del licor negro	46
7.	Evaluación Operacional.....	58

7.1	Evaluación de posibles causas de ensuciamiento prematuro.....	58
7.1.1	Evaluación causas propias del área evaporadores.	60
7.1.1.1	Presión de trabajo. Vacío final tren evaporadores	60
7.1.1.2	Eficiencia separación jabón-licor.....	61
7.1.2	Evaluación causas ajenos de área evaporadores.....	63
7.1.2.1	Causticidad.....	63
7.1.2.2	Análisis granulométrico.....	65
7.1.2.3	Contenido de Fibra en el Licor.	68
7.1.3.	Teoría de ensuciamiento por precipitación de sales de sodio.....	69
7.1.4	Probable origen de ensuciamiento en evaporadores: Tiempo prolongado de la madera almacenada.....	78
7.1.4.1	Efecto del almacenamiento en respuestas del proceso kraft.	79
7.1.4.2	Análisis del efecto del tiempo prolongado de almacenamiento de rollizo de pino radiata en evaporadores.....	79
7.1.4.3	Metodología de obtención del tiempo de almacenamiento madera.	80
7.1.5	Posible (s) relación(es) entre el tiempo prologando de la madera de pino almacenada y la precipitación de sales de sodio.....	86
8.	Análisis Económico.....	88
9.	Conclusiones y recomendaciones.....	91
10.	Anexo	94
10.2	Resumen Beneficio mejora evaporadores.....	94
10.2	Análisis de licor negro concentrado. Razón carbonato/sulfato.	96

Introducción

Durante el proceso de pulpaje kraft, existen diversos reactivos que deben ser recuperados para ser, por un lado, que el proceso sea lo más rentable posible y, además, fomentar un ambiente libre de contaminantes. Dentro del proceso recuperación de reactivos, existen unidades en Plantas de Celulosa, que se preocupan de la transformación química del principal insumo destinado al proceso de cocción de la madera: el licor blanco; el cual es una mezcla de hidróxido de sodio y sulfuro de sodio, entre otros elementos, donde el primer compuesto se encarga de degradar la lignina de la madera y el segundo actúa como acelerador de la reacción de cocción. El licor blanco y su participación en el proceso de cocción indica el comienzo del “ciclo de licor”, que continuará con el licor negro, posteriormente, licor verde y volviendo, finalmente a licor blanco. Posteriormente, al proceso de cocción se realiza el lavado de pulpa lo que genera un fluido viscoso denominado licor negro; de composición orgánica (lignina, principalmente) e inorgánica (carbonato de sodio, sulfato de sodio, sulfuro de sodio, entre otras diversas sales). Dicha mezcla de sales inorgánicas y compuestos orgánicos presentes en el licor negro conforman lo que se conoce como: cantidad de sólidos presentes en el licor negro, representado comúnmente como porcentaje (%) de sólidos. Este licor negro, que proviene desde lavado, posee una cantidad relativamente baja de sólidos, por lo cual, es denominado licor negro débil. Para obtener una mayor cantidad de sólidos es necesario pasar a etapas de evaporación, las cuales están a cargo de equipos denominados evaporadores o concentradores. Ahora bien, como el licor negro es un fluido viscoso de composición compleja posee diversas sales que a medida que el licor comienza a alcanzar temperaturas elevadas y mayor porcentaje de sólidos, las sales (principalmente de sodio) comienzan a cristalizar y, posteriormente, a precipitarse en las superficies de transferencias de calor. Dicha problemática es común en plantas de producción de celulosa y, por supuesto, Planta Constitución no ha sido la excepción. Conocer las causas de ensuciamiento (por el lado del licor negro) ha sido prioridad para poder enfrentar de mejor forma la problemática que conlleva poseer evaporadores y/o concentradores sucios. Es por esto que, por un lado, conocer teóricamente la fenomenología del proceso de ensuciamiento, sus posibles causas y contrastarlos con el proceso general de producción de celulosa en Planta Constitución, será el eje central de la presente investigación a fin de encontrar la causa que ayude a solucionar, en gran parte, dicha problemática.

1. Antecedentes

1.1 Descripción de la empresa

La empresa Celulosa Arauco y Constitución S.A. es una sociedad anónima cerrada formada en el año 1979 tras la fusión de las industrias de Celulosa Arauco S.A y Celulosa Constitución. Su creación se desarrolló con el fin de administrar de mejor forma los recursos forestales del país y, también, mejorar la calidad de los terrenos agrícolas degradados; además de generar mayores empleos. Actualmente su principal accionista y controlador es Empresas Copec S.A, con una participación de un 99,9780% de las acciones de ARAUCO.

ARAUCO, como empresa, es considerada una de las compañías más grandes del sector forestal en el mundo, siendo una de las mayores empresas productoras de celulosa, además, poseer lugares relevantes en producción de madera aserrada y paneles. Actualmente, la compañía forestal más predominante en Latinoamérica es ARAUCO, debido principalmente por su liderazgo en costos, tanto en celulosa de fibra larga, como también, en fibra corta. En el plano local, la compañía posee las mayores exportaciones en términos de ingresos por ventas.

La industria de la celulosa-“*commodity*” de mayor presencia en los productos de uso cotidiano- es obtenida de la fibra de madera y utilizada para la manufactura del papel de impresión y escritura, entre otros. A partir del grado de elaboración del papel, se puede distinguir entre una celulosa cruda o blanqueada, y también, conocer de qué especie proviene, es decir, celulosa de fibra larga (coníferas) o celulosa de fibra corta (por ejemplo el eucalipto).

A pesar de que existen diferentes grados de elaboración y variedades existentes- por ejemplo celulosa obtenida de pino radiata, que posee fibras largas, utilizada para entregarle durabilidad y fuerza a los productos del papel, como también celulosa blanqueada, la cual es utilizada principalmente en la fabricación de papeles de impresión, tissue, escritura, entre otros. Además está la celulosa producida de maderas duras, como el eucalipto, que posee fibras cortas y que se utiliza en la producción de productos del papel en combinación con la fibra larga- la demanda

mundial en el año 2013 fue de 171 millones de toneladas, siendo solamente 60 millones de toneladas transadas en el mercado (*Marketpulp*), el resto es utilizada para la fabricación de papel.

Una característica que posee ARAUCO es su economía de escala, lo que implica, construir plantas de gran capacidad para aprovechar esa ventaja, además de, operarlas con sofisticadas tecnologías. A continuación en Tabla 1 se presenta un resumen con las distintas instalaciones de ARAUCO y características más relevantes.

Tabla 1. ARAUCO instalaciones

Planta	Ciudad	País	Capacidad [Tm/año]	Tipo
Licantén	Licantén	Chile	150000	Kraft cruda de pino
Constitución	Constitución	Chile	335000	Kraft cruda de pino radiata
Nueva Aldea	Ránquil	Chile	1027000	kraft Blanqueada Pino y eucalipto
Arauco	Arauco	Chile	790000	kraft Blanqueada Pino y/o eucalipto
Valdivia	SJ de la mariquina	Chile	550000	kraft Blanqueada Pino y eucalipto
Alto Paraná	Provincia de misiones	Argentina	350000	Kraft Blanqueada de pino taeda y celulosa fluff
Montes del Planta	Punta Pereira	Uruguay	1300000	Kraft blanqueada de eucalipto

Fuente: Elaboración propia

1.2 Ubicación de la empresa

Planta Constitución se encuentra ubicada en la Región del Maule, específicamente en la ciudad de Constitución con dirección en Avenida Enrique Mac Iver 505.

En la siguiente Figura 1 se muestra una vista panorámica de la planta con sus respectivas instalaciones actuales.



Figura 1. Vista satelital celulosa Arauco planta Constitución
Fuente: Google maps.

1.3 Materias primas requeridas por el proceso

Con respecto a las materias primas; rollizos de eucaliptos, pino pulpable, pino aserrable, son materias primas que ARAUCO posee en su patrimonio forestal y que provee a las diferentes instalaciones de la empresa, siendo, además, la base de la competitividad de ARAUCO.

Durante el año 2014 se cosecharon cerca de 21,9 millones de m^3 de rollizos, además, se produjeron 0,4 millones de m^3 de astillas y 0,8 millones de m^3 de material combustible (principalmente corteza extraída de los árboles). Por otro lado, para satisfacer la demanda de celulosa, es necesario la compra de rollizos, astillas y material combustible a empresas externas o “terceros”, las cuales representan un total de 10,6 millones de m^3 .

Ahora bien, para producción interna de celulosa, paneles y ocupación de aserraderos, se ocuparon, del total disponible, 29.2 millones de m³ en especies como: rollizos, astillas y material combustible y, tan solo 2.9 millones de m³ fueron vendidas a externos. A continuación se detalla el patrimonio de ARAUCO por uso:

Tabla 2.Distribución del patrimonio por uso (en hectáreas)

País	Pino	Eucalipto	Otras Especies	Total Plantaciones	Bosque Nativo	Otros Usos	Total
Chile	571.638	150.580	2.787	725.005	210.725	139.303	1.075.033
Argentina	97.643	15.856	17.611	131.110	115.559	5.809	252.478
Brasil	51.016	23.230	151	74.397	63.504	5.355	143.256
Uruguay	200	71.466	209	71.875	4.935	32.527	109.337
Total	720.497	261.132	20.758	1.002.387	394.723	182.994	1.580.104

Fuente: Elaboración propia en base a datos de Memoria Arauco 2014

A continuación se presentan la relación de plantación y cosecha de ARAUCO durante el período 2005-2010.

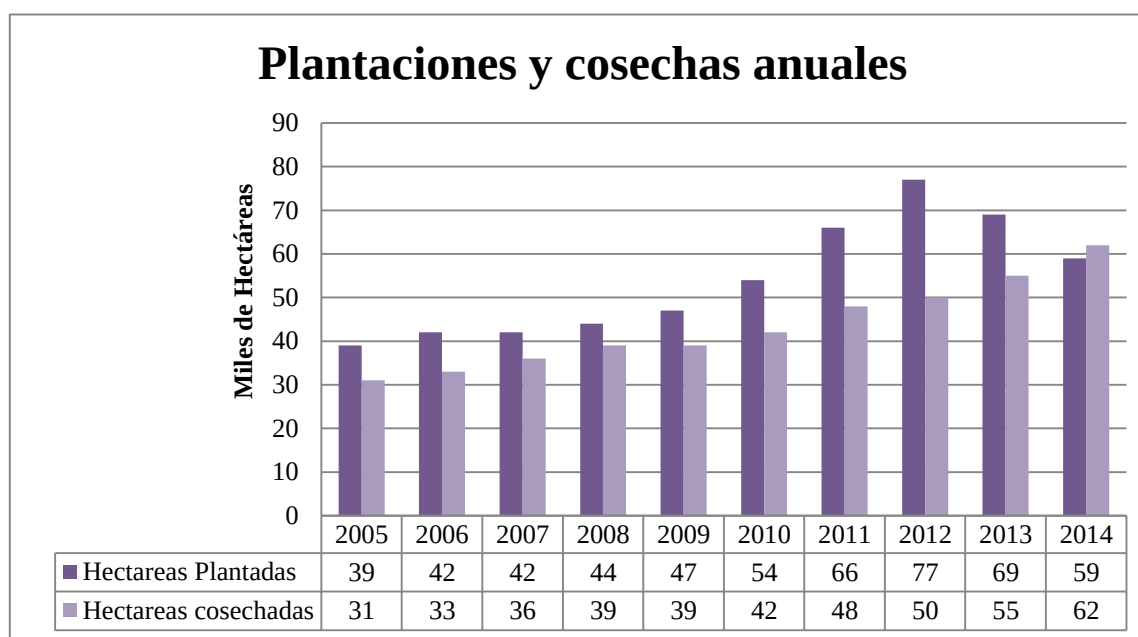


Figura 2.Plantaciones y cosechas anuales período 2005-2014

Fuente: Elaboración propia en base a datos de Memoria Arauco 2014

Nota: El aumento de hectáreas cosechadas -período 2014- se debió por puesta en marcha de Montes de Plata

1.4 Productos elaborados por el proceso

Existen cinco negocios donde ARAUCO Chile centra sus funciones, estos son: Forestal, madera, paneles, energía y finalmente celulosa. Ésta última área es la encargada de la producción de distintos tipos de pulpa de madera, utilizando madera exclusiva desde plantaciones de pino y eucalipto.

Los distintos tipos de celulosa o pulpa generados durante el proceso son: Celulosa blanqueada, celulosa sin blanquear y celulosa fluff .A continuación se describen los principales tipos de celulosa:

- **Celulosa kraft blanqueada de pino (BSK):** Se utiliza para papeles de escritura, impresión y papeles sanitarios.
- **Celulosa kraft blanqueada de eucalipto (BHK):** Se utiliza para papeles de escritura e impresión y papeles sanitarios
- **Celulosa kraft sin blanquear de pino (USBK):** Se utiliza para material embalaje, papeles dieléctricos, fibrocementos y otros.

En la actualidad, Arauco, se ubica dentro de los principales productores de celulosa en el mundo, debido, principalmente, a los estándares de producción mantenidos en el tiempo. A la fecha Arauco ha incrementado cerca de un 30 % la producción de celulosa, llegando a los 4,2 millones de toneladas de celulosa en sus seis plantas.

Un evento relevante, ocurrido durante el año 2015, fue la aprobación del proyecto que consistía en producir pulpa textil en la planta de celulosa Valdivia, significando una innovadora inversión y, por supuesto, competir en un nuevo nicho de mercado.

Con respecto a la pulpa textil, se puede decir que es materia prima para producir una variedad de productos, de los cuales se destacan: fibras textiles, Rayón o Viscosa, papel celofán, filtros, etc.

1.5 Proceso de sulfato

Celulosa Arauco y Constitución, como se mencionó anteriormente, posee distintos tipos de celulosa o pulpa. Planta Constitución posee sola una línea de producción, siendo ésta del tipo cruda o sin blanquear. El proceso para la obtención de la pulpa química utilizada por la planta Constitución es el proceso kraft o sulfato; utilizado en gran parte de las empresas en el mundo. Éste proceso comienza cuando las astillas se someten al proceso de pulpaje en presencia de hidróxido de sodio (NaOH) y sulfuro de sodio (Na_2S), los cuales reaccionan con la madera (astillas) provocando la disolución de la lignina, logrando así la separación de las fibras que forman la madera.

Este proceso surgió como alternativa al proceso anterior, llamado soda en caliente; primer pulpaje químico conocido y, que, posteriormente, desplazó al proceso sulfito debido principalmente a razones como: tiempos de cocción más cortos, procesos de recuperación de reactivos del licor negro bien establecidos, la pulpa producida posee mayores propiedades de resistencia mecánica, entre otros.

A continuación se detallan las principales unidades del proceso Kraft en planta constitución, divididas en Área Fibra y Área de recuperación y Energía:

1.5.1 Área Fibra

1.5.1.2 Área preparación madera

En esta área, que consta de una superficie aproximada de seis hectáreas, se prepara la madera bajo riego por aspersión, para así mantener dos tipos de maderas, mediante clasificación de densidad, es decir, densidad aparente de alta y densidad aparente de baja.

Un almacén de 22.000 MR, es suficiente para cubrir aproximadamente 7 días de producción en la planta. Posterior al almacenaje, comienza el astillado; que consiste en las instalaciones que van

desde los descortezadores hasta los equipos que alimentan las astillas a la pila de almacenamiento.

1.5.1.2 Área digestores

Planta constitución en sus instalaciones posee diez (10) digestores *Batcho* discontinuos, en los cuales se produce la pulpa kraft en condiciones de calidad y cantidad especificadas, utilizando para la producción de pulpa pino radiata más reactivos de cocción.

Estos reactivos en el interior de los digestores realizan la reacción de cocción de las astillas de madera provenientes del proceso de preparación madera. Ésta reacción de cocción es, básicamente, la disolución de la lignina bajo la acción del licor blanco; compuesto formado por hidróxido de sodio y sulfuro de sodio, a temperaturas y presión de 155°C y 900 kPa, respectivamente.

1.5.1.3 Área lavado y clasificación

La pulpa proveniente de la etapa de cocción es descargada a estanques con una consistencia entre los 4 y 6 %. La principal función, de esta área, es obtener un producto limpio y, además, recuperar los reactivos químicos y compuestos de la madera.

1.5.1.4 Área de secado y línea final

Tras pasar por la máquina Fourdriner, encargada de formar la hoja de celulosa, y, además, pasar por una serie de etapas de prensado para extraerle el máximo de agua posible, la hoja pasa a la etapa de secado, donde seca por insuflación de aire caliente mediante ventiladores.

Terminada la etapa de secado, se pasa a la máquina cortadora y formadora de fardos, lo que posteriormente pasarán a la línea de embalaje, con su correspondiente prensado, cubierto con tapas de celulosa, amarrado e identificado, para finalmente ser almacenado en la bodega de productos terminados.

1.5.2 Área de recuperación y energía

1.5.2.1 Área desmineralizado

Esta área tiene como función de almacenar, producir y distribuir agua con la pureza requerida para cada proceso, es decir, eliminar todas las impurezas que aún puede venir desde la planta de agua, además de extraer los elementos metálicos, principalmente, calcio y magnesio; además, los elementos no metálicos como óxidos de hierro y sílice, los cuales se encuentran en forma de sales.

1.5.2.2 Área evaporadores

Su función es extraer el agua presente en el licor negro débil (LND) proveniente del proceso de lavado en el área de pulpa. El proceso se lleva a cabo mediante la aplicación de calor a través de la inyección de vapor al sistema. A medida que se va evaporando el agua, el licor va concentrándose, pasando de un licor negro débil (16 a 19% de sólidos), licor intermedio (27 a 37 % de sólidos), para luego pasar, finalmente, al 1º efecto; el cual consiste en una serie de concentradores de película descendente que operan en serie para entregar el porcentaje de sólidos necesarios para producir la combustión en la caldera.

1.5.2.3 Área caustificación

En este proceso se realiza la recuperación del sodio (Na) presente el licor verde como carbonato de sodio (Na_2CO_3), mediante la adición de cal viva u óxido de calcio (CaO). En esta área se produce el licor blanco (LB), que es utilizado en el proceso de obtención de pulpa de celulosa en los digestores

1.5.2.4 Área Horno de cal

En el horno de cal se realiza la disociación del lodo de carbonato procedente de la planta de caustificación, esta disociación se realiza bajo altas temperaturas con el fin de producir Cal y CO_2 . Este Horno es un equipo importante en el circuito de recuperación de reactivo en la planta de celulosa.

Además de generar la disociación del lodo de carbonato, el horno de cal quema los gases incondensables (TRS) provenientes las distintas áreas de la planta Constitución.

1.5.2.5 Área planta de agua

Planta de agua es la encargada de recibir el agua captada desde las orillas del río Maule, distante a 13 kilómetros de la planta. El agua una vez almacenada es sometida a tratamientos con reactivos químicos, con el objeto de eliminar impurezas propias de la extracción.

1.5.2.6 Área caldera de poder

La caldera poder tiene como función principal solo la generación de vapor. Dicho vapor se genera por el calor generado tras la combustión de la mezcla de material orgánico (corteza) y lodos provenientes de la planta de tratamiento de efluentes.

1.5.2.7 Área caldera recuperadora

La caldera recuperadora posee dos funciones principales, estas son:

- a) **Recuperación química:** Tras la quema de los materiales orgánicos presentes en el licor negro, se realiza, al mismo tiempo, la reducción de las sales de sodio las que son drenadas como fundido en la parte inferior del hogar.
- Las sales drenadas como fundido se mezclan con licor blanco débil para dar origen al licor verde, el cual es bombeado al área de caustificación para su procesamiento.
- b) **Generación de vapor:** Se produce debido al calor generado mediante la combustión de la materia orgánica presente en el licor negro concentrado. Éste calor es transferido al agua a través del contacto entre los tubos que la contienen y los gases de combustión, generando finalmente vapor de alta.

1.5.2.8 Área de generación de energía

Esta área está constituida por tres turbogeneradores que utilizan el vapor generado tanto por la caldera de poder ,como también, la caldera recuperadora para generar energía eléctrica. Además, entrega vapor de mediana y baja presión para las diferentes áreas de la planta.

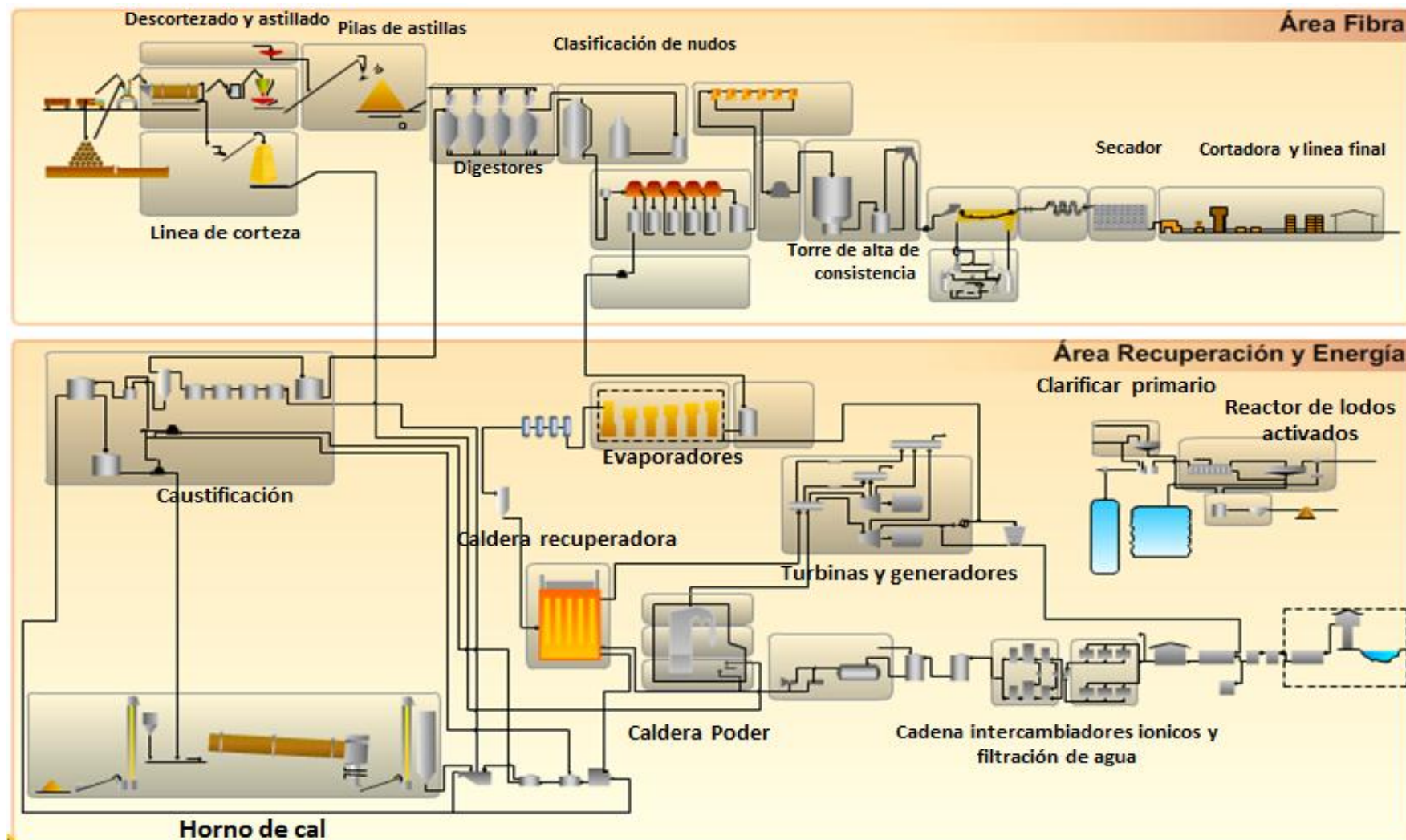


Figura 3. Esquema simplificado proceso kraft Planta Constitución. [26]

2. Objetivos

2.1 Objetivos Generales

Analizar y evaluar el proceso productivo de la industria de la celulosa para el efecto del ensuciamiento prematuro de concentradores en planta térmica.

2.2 Objetivos Específicos

- Determinar, evaluar y analizar las principales causas que generar el ensuciamiento prematuro de los concentradores de planta térmica en el proceso general de producción de celulosa.
- Definir buenas prácticas operacionales para evitar y mitigar el ensuciamiento temprano de concentradores.
- Evaluar económicamente la implementación de mejoras en evaporadores.

3. Evaporación

El objetivo principal de una planta de evaporación es aumentar la concentración de sólidos secos del licor negro débil por evaporación de agua para conseguir una concentración en el licor que pueda ser quemada en la caldera de recuperación. Esta concentración normalmente se encuentra entre 65%-75% de sólidos secos, que en algunos casos, sobre todo en instalaciones más modernas, esta concentración llegaría hasta el 80% de sólidos secos. Además de generar un licor negro concentrado, mediante la separación de agua desde el licor; también la evaporación de licor posee las operaciones unitarias de: Procesar los condensados, de modo de separar los condensados limpios y contaminados y, también, la separación de jabón del licor negro.

El proceso básico de operación de la evaporación, es la transferencia de calor de vapor, provocando su condensación, hacia el licor negro circulante elevando su temperatura o punto de ebullición (calor sensible), seguido de la transferencia de calor del vapor al licor causando ebullición parcial, logrando así pasar de la fase líquida a fase vapor (calor latente).

La transferencia de calor hacia el licor es conseguida por la condensación de vapor, el cual fluye por la carcasa de un intercambiador de calor y, la superficie por donde fluye el licor, es decir, los tubos del intercambiador. Ahora bien, si un solo evaporador es utilizado para concentrar cualquier solución, este es llamado evaporador de único efecto y, por otro lado, si se usa más de un evaporador para el proceso de concentración del licor, este sistema se llama evaporadores de múltiples efectos.

Es sistema más usado dentro de la fabricación de celulosa es el de evaporación de múltiple efecto, ya que, obtiene mejores resultados en términos de consumo de vapor. A continuación se describen las posibles disposiciones de flujo de licor, que pueden ser contracorriente o equicorriente (co-corriente) con respecto a la entrada de vapor.

- Co-corriente: El vapor vivo o el líquido entran en el mismo efecto, ósea, ambos en el primer efecto. La gran ventaja que posee esta disposición es que no tiene la necesidad de bombas para el transporte de licor de un evaporador a otro, ya que el fluido se transporta

de forma natural debido, principalmente, a la diferencia de presión entre un recipiente y otro.

- Contracorriente: En esta disposición, el vapor vivo entra al primer efecto, mientras que el líquido entra en el último efecto, siendo bombeado, posteriormente, a los efectos anteriores. Esta disposición es más eficiente que la anterior, ya que, posee una mayor economía de vapor.

A continuación, el Figura, se muestran las correspondientes configuraciones contracorriente y co-corriente.

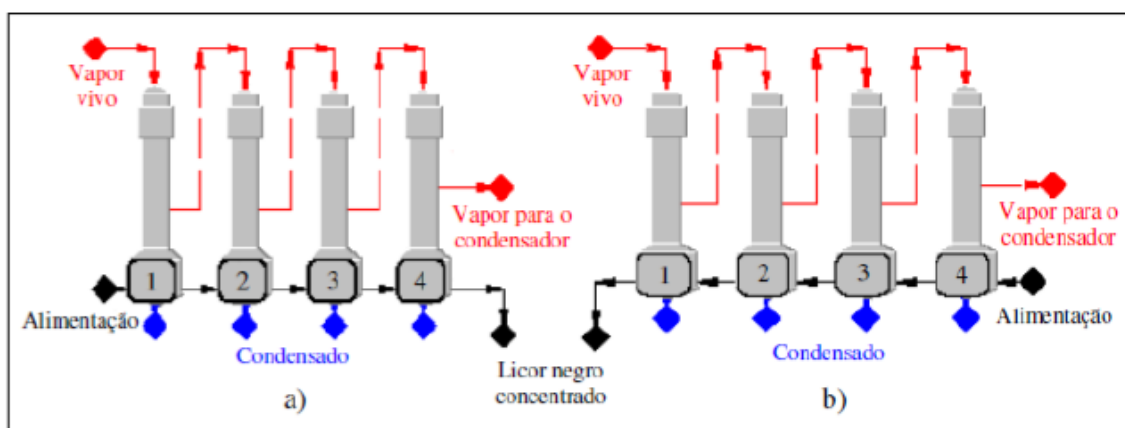


Figura 4. Arreglos de sistemas de evaporación en múltiple efecto. A) Co-corriente) Contra-corriente [20]

3.1 Aplicaciones de los evaporadores

Los evaporadores son utilizados en una serie de industrias de procesos, tales como: Papel y celulosa, cloro alcalino, azúcar, productos farmacéuticos, alimentos, entre otros. [1]. Para aumentar la durabilidad de ciertos productos en la industria de las bebidas y alimentos, el secado de sustancia en laboratorios, recuperación de solventes con alto valor agregado o la concentración de productos como: jarabe de azúcar, licor negro y tratamiento de aguas residuales.

3.2 Tipo de evaporadores

Los evaporadores son clasificados de acuerdo a las siguientes características:

1. Evaporadores en que el medio de calentamiento del líquido es una superficie de calentamiento tubular.
2. Evaporadores en el que el medio de calentamiento está conformado de serpentines y chaquetas.
3. Evaporadores en el que el medio de calentamiento es colocado en contacto directo con el líquido a evaporar.
4. Evaporadores en el calentamiento del líquido se lleva a cabo mediante radiación solar.

Evaporadores con superficie de calentamiento tubular son los más comunes en plantas de evaporación. En estas superficies, la circulación del líquido puede ser natural (ebullición) o por circulación forzada (métodos mecánicos).

Tipos diferentes de evaporadores son los siguientes:

- Evaporadores de tubos horizontales.
- Evaporadores de tubos cortos verticales.
- Evaporadores de tubos largos verticales.

Con respecto a los tipos de evaporadores anteriormente mencionados, los de tubos largos verticales son más económicos y, además, poseen un sistema de mayor versatilidad, en comparación a los otros tipos. Ahora bien, la elección también pasa por diferentes características que posean estos tipos de evaporadores, tales como: capacidad de ensuciamiento, corrosión y la formación de espuma.

La formación de depósitos de sólidos en los evaporadores, principalmente en los primeros efectos y de forma pronunciada, trae como consecuencia, la disminución del rendimiento de una planta de evaporación. Es por esto que, se han adoptado prácticas de limpieza a forma de prevenir grandes pérdidas debidas, en mayor medida, a la formación de incrustaciones.

En plantas de papel y celulosa, existen básicamente dos tipos de evaporadores de tubos largos verticales en las correspondientes unidades de evaporación de licor negro, que son: Evaporadores de Flujo Ascendente (*Rising Film* (RF)) y Evaporadores de Flujo Descendente (*Falling Film* (FF)).

3.2.1 Evaporadores de Película Ascendente (*Rising Film*)

Este tipo de evaporador, también llamado LTV (*Long Tube Vertical*), dominó la industria por décadas, sin embargo, actualmente, opera sólo en antiguas fábricas de evaporación.

Con respecto a lo elementos de calentamiento, éstos están formados por un sistema de carcasa o casco largo y tubos de intercambio de calor. El licor se alimenta por la parte inferior y en seguida entra a los tubos. Dentro de los tubos, en flujo ascendente, el licor se calienta debido a la condensación del vapor que fluye por fuera de tubos. La parte del inferior del tubo se utiliza para precalentar el licor hasta su punto de ebullición, donde alcanza la presión suficiente para iniciar la evaporación. Conforme el licor va subiendo por los tubos, la mezcla de vapor generado aumenta la velocidad hasta alcanzar su máximo a la salida de los tubos. Dicha mezcla se encuentra con un deflector instalado (comúnmente llamado Demister), instalado por encima de la tubería de salida, que separa el vapor producido del licor. El licor concentrado es descargado del evaporador por un canal inferior.

La tasa de transferencia de calor en la sección de precalentamiento es baja, debido al lento movimiento del licor, a medida que se acerca a la sección donde ocurre la ebullición del licor, la transferencia de calor aumento debido, principalmente, a la turbulencia por la existencia de dos fases, unas de las cuales es el vapor producido. A continuación se presenta, en la Figura 5, un evaporador tipo flujo ascendente (RF).

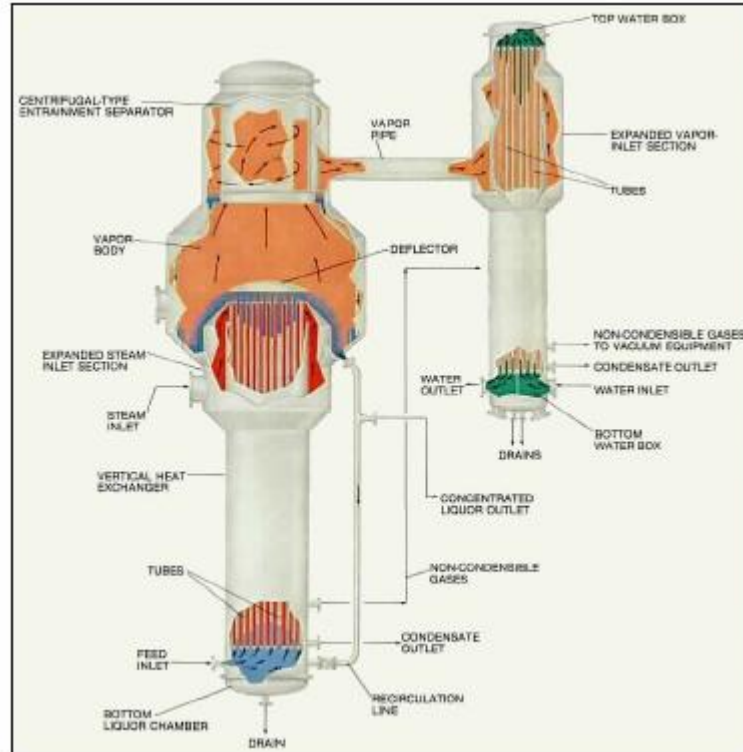


Figura 5. Evaporador tipo Flujo Ascendente (Rising Film) [20]

3.2.2. Evaporadores de Película Descendente (*Falling Film*)

Son evaporadores de tubos largos de flujo descendente. La solución se alimenta por el tope del evaporador, fluyendo internamente -debido a la acción de la gravedad- por los tubos en forma de película.

Este equipo requiere de la automatización adecuada, debido a que es más propenso a variaciones de carga y, por otro lado, opera con circulación forzada, a través de bombas. Con respecto a la limpieza, ésta puede ser realizada con agua pura o el propio licor diluido con el fin de evitar la formación de incrustaciones.

Las principales ventajas de estos tipos de evaporadores son el poder operar con líquidos viscosos, poseen baja caída de presión, poseen altos coeficiente de intercambio térmico y, por otro lado, las incrustaciones y el tiempo de residencia son menores. Ahora bien, el principal problema asociado a estos tipos de evaporadores es, que la solución esté igualmente distribuida en todos los tubos. En los evaporadores Falling Film (FF) se acumula cierto volumen de licor en su interior. Ese volumen se hace circular continuamente a la parte superior del elemento calefactor. La velocidad de circulación es mayor que la velocidad de transferencia de calor garantizando, por lo tanto, que la concentración y otras propiedades de licor sean iguales a la corriente de salida.

Estos equipos constan de un elemento de calentamiento y un cuerpo de vapor. El medio de calentamiento es similar al tipo de evaporador *Rising Film*. A continuación se presenta, en la Figura, un evaporador tipo *Falling film*.

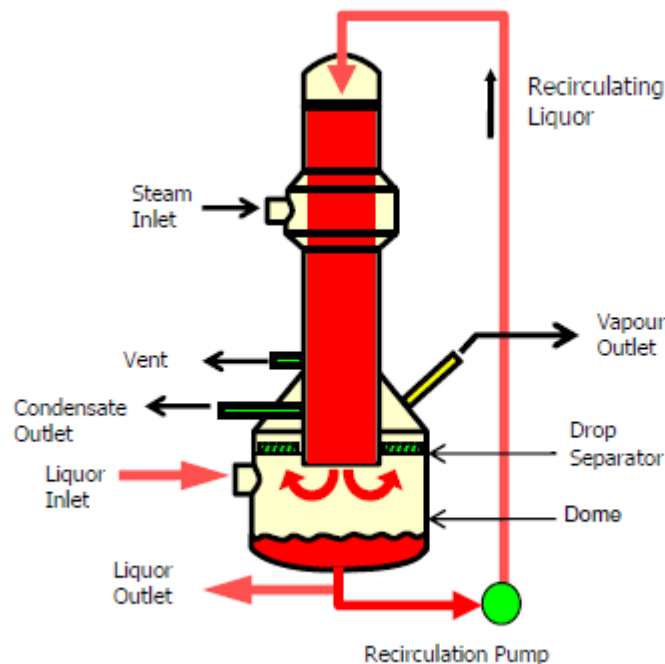


Figura 6. Evaporador tipo Flujo Descendente (*Falling Film*) [21]

Debido a las ventajas mencionadas anteriormente, los evaporadores de película descendente han sido elegidos para la mayoría de las instalaciones nuevas en los últimos años.

4. Alcances de la Unidad Evaporadores Planta Constitución

La planta celulosa Constitución posee una planta de evaporación, encargada de concentrar el licor negro, que fue instalada a mediados de los años setenta. Esta planta ha sido ampliada y modificada en diversas ocasiones.

El proceso comienza con la evaporación del agua del licor negro pobre o licor negro débil (LND) procedente de la línea de fibra.

La capacidad de diseño de la unidad es de 320 [t/h] de agua y una capacidad de concentración de licor negro del 75%, sin embargo, actualmente, no se logra dicha capacidad y rendimiento para el cual se diseñó.

Los evaporadores y/o concentradores usualmente son de tipo flujo ascendente (*Rising Film*) o Flujo descendente (*Falling Film*). En Planta Constitución existen ambos tipos, siendo, en la actualidad, el evaporador de flujo descendente es más ocupado. A continuación, en la Tabla 3, se indican los efectos y sus tipos de evaporadores o concentradores ocupados en éstos.

Tabla 3. Tipos de evaporadores encontrados en cada efecto

Área evaporadores Planta Constitución									
Efectos	Efecto 1				Efecto 2		Efecto 3		Efecto 4
Conc/evap	1D	1C	1B	1A	2A	2B	3A	3B	-
Rising Film									
Falling Film									

Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos en área evaporadores

Es necesario precisar, que el correspondiente efecto 1 es una serie de intercambiadores de calor llamados Concentradores, de los cuales el concentrador 1D es de tubos y carcasa, mientras que los restantes (1C, 1B, 1A) son tipo bandeja. Además éste efecto posee la característica de ser con recirculación forzada. Otro punto importante donde se da esta configuración de recirculación forzada en el efecto 5 y 6. A continuación, en la Figura 7, se presenta una imagen del Área de evaporadores.



Figura 7. Evaporadores Planta Constitución (CELCO) [27]

Ahora bien, como fluido calefactor se utiliza vapor de baja, es decir, $3,5 \text{ [kg/cm}^2\text{]}$ tratando de optimizar su uso y, también, vahos provenientes de los efectos anteriores.

4.1 Bases de diseño

4.1.1 Especificaciones de alimentación

La alimentación de diseño de la planta de evaporación tiene las siguientes propiedades:

Tabla 4. Especificación alimentación a evaporadores (Celco)

Especificaciones de alimentación			
Producto	Flujo [kg/h]	densidad[°Be]	Temperatura [°C]
Licor negro débil	270	8-9	80

Fuente: Elaboración propia

Ahora bien, es necesario indicar la composición química y las correspondientes propiedades del licor negro, para entender mejor la fenomenología de este tipo de combustible.

4.1.1.1 Composición química y propiedades

El licor que ha escurrido del proceso de lavado de pulpa y ha salido de lavadores, es una solución acuosa, que posee en gran medida lignitos de madera, madera orgánica (combustible) y compuestos inorgánicos oxidados en el proceso de cocción. En dicho proceso de cocción existe una mezcla de materiales orgánicos e inorgánicos en proporción cercana o entre 13-17 % de sólidos. A medida que el número de etapas de lavados de pasta aumenta, la cantidad de agua de dilución disminuye. Ahora bien, existen tipos de digestores que utilizan para la cocción tipo de calentamiento directo y el lavado de pulpa se concentra en 5 ó 6 etapas, por lo que la concentración del licor negro enviado hacia evaporadores posee un contenido de sólidos aproximadamente de 22 %.

La temperatura del licor se encuentra entre los 70 y 95 [°C], dependiendo de número de etapas de lavado y la temperatura del agua caliente utilizada en dicha operación. A continuación se presenta una tabla con las composiciones típicas del licor negro:

Tabla 5.Composición típica de un licor negro [2]

Compuesto	% de solidos secos [%m/m]
Lignina	29-40
Hemicelulosa	0,1-1,5
Ácidos orgánicos	1-14
Alcoholes	<1
Compuestos orgánicos desconocidos	10-30
Compuestos inorgánicos desconocidos	<2
Sales inorgánicas	18-30
Compuestos orgánicos combinados con Na	8-10

Con respecto a la fracción inorgánica presente en el licor, los principales compuestos que forman parte son: Na_2CO_3 , Na_2SO_4 , $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, Na_2S , NaOH y NaCl , pertenecientes a las llamadas sales de sodio y, en menor medida, sales de potasio, magnesio, silicio y hierro [3]. Es necesario poner énfasis en las correspondientes sales Carbonato de sodio (Na_2CO_3) y Sulfato de sodio (Na_2SO_4) por su tendencia a precipitar, o bien al sulfuro de sodio (Na_2S) olor fuerte característico de las industrias que utilizan el proceso kraft, como planta Celulosa Constitución (Celco).

A continuación, se presenta la composición elemental típica presente en el licor negro:

Tabla 6.Composición elemental típica del licor negro. [4]

Composición elemental [% m/m de solidos secos]							
C	H	N	Na	K	S	Cl	Si
30-39	3,3-4,5	0,01-1	8,8-21,8	1,8-3,1	0,8-5,7	0,3-4,5	0,1-3,8

A continuación, se aprecia el ciclo del licor de forma genérica a través de la Figura 4:

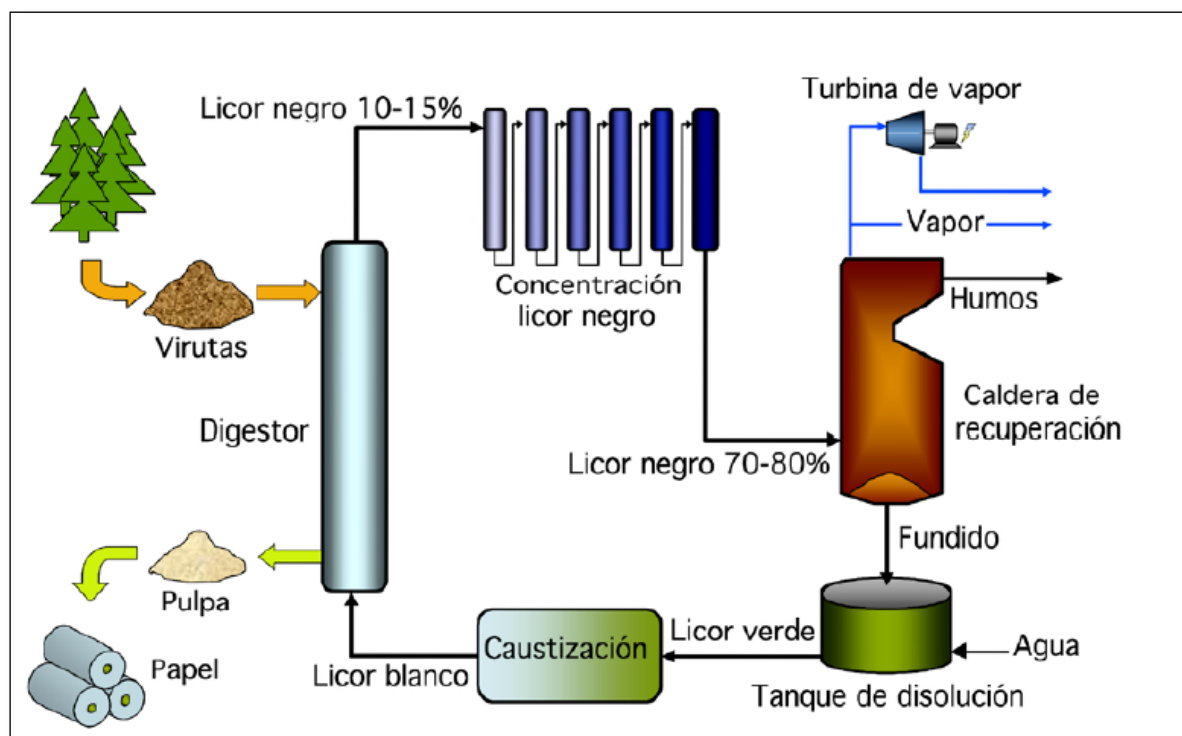


Figura 8. Procesos de licor blanco, verde y negro [28]

4.1.1.2 Propiedades físicas

Al igual que la composición química anteriormente mencionada, las propiedades físicas del licor negro también son de naturaleza compleja, principalmente debido a sus características reológicas y, que dependen del tipo de madera y el método de cocción. El conocimiento de estas propiedades reológicas ayudarán a futuros cálculos de proceso.

4.1.1.3 Contenidos de sólidos secos

Se define el contenido de sólidos secos del licor como la relación de las masas o pesos de la muestra antes y después de la someterla a secado a 105[°C] en un intervalo de tiempo [5].

4.1.1.4 Viscosidad

La viscosidad del licor negro es una propiedad bastante importante en el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor (U) en los correspondientes efectos en la evaporación debida, principalmente, a que influye en el coeficiente de película, que es el encargado de la resistencia de intercambiar calor por convección en el licor. El coeficiente global de transferencia de calor (U) es el encargado de englobar las resistencias de convección y conducción que participan en el intercambio térmico.

En general, la viscosidad del licor negro tiende a aumentar a medida que el contenido de sólidos solubles aumenta y, por otro lado, la temperatura disminuye. Por otro lado la viscosidad del licor negro varía significativamente con la especie de madera utilizada, las condiciones de cocción en el digestor y el correspondiente tratamiento térmico.

A continuación se muestra un gráfico que muestra la influencia del contenido de sólidos secos y temperatura del licor obtenido en dos procesos de obtención de celulosa; el primero (en azul) muestra el proceso kraft de madera tipo pino (similar al proceso realizado en Celco) y el segundo (rojo) una mixtura de polisulfuro (PS) y antroquinona (AQ).

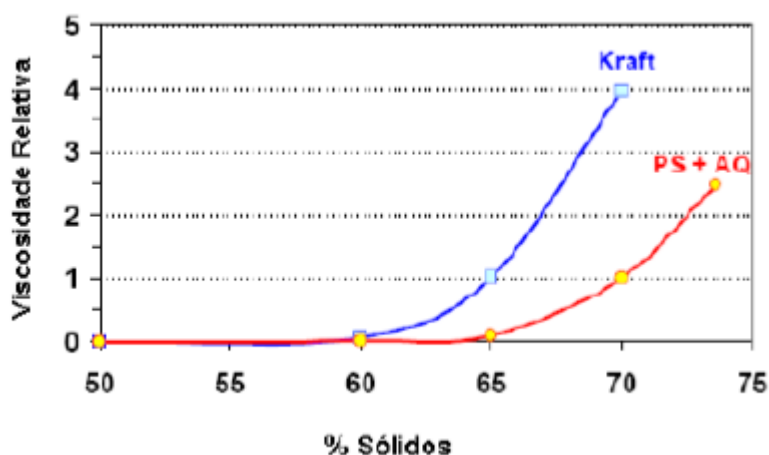


Figura 9. Viscosidad relativa (cinemática) vs % de sólidos de licor negro de pino kraft y PSAQ a 100 [°C] [5]

En la Figura 9 se observa que la viscosidad aumenta exponencialmente a medida que aumenta el contenido de sólidos.

A continuación, en la Figura 10, se presenta la relación entre la viscosidad absoluta (dinámica) versus la temperatura:

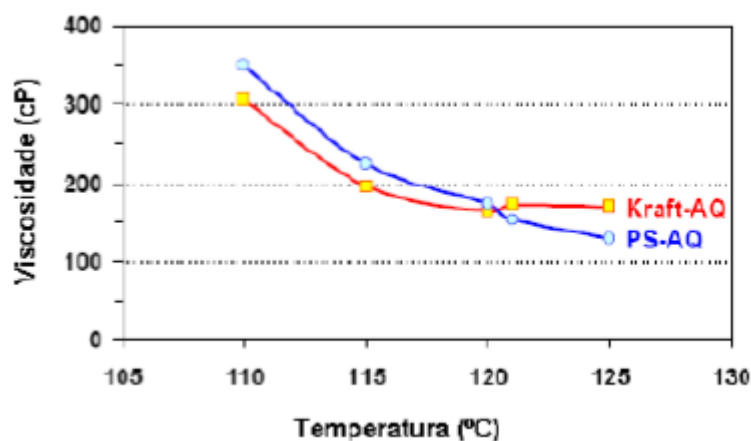


Figura 10. Viscosidad absoluta (dinámica) vs temperatura del licor negro de pino kraft y PSAQ con 70 % de sólidos [5]

4.1.1.5 Masa específica o densidad

La densidad afecta la capacidad de fluir del licor negro, por un lado, a baja cantidad de sólidos, la densidad se aproxima a la densidad del agua (a una misma temperatura). Un licor con una concentración de 16% de sólidos secos su densidad sería aproximadamente de $1,05[t/m^3]$. A 70 % de sólidos secos, la densidad estaría en un valor cercano de $1,43[t/m^3]$ [6]. A medida que la concentración de sólidos es más alta, la masa específica o densidad depende de dos materiales: componentes inorgánicos y orgánicos que constituyen el sólido.

4.1.1.6 Calor específico

La capacidad calorífica es el calor necesario para elevar un grado la temperatura de una unidad de masa de un material, que para efecto de este estudio corresponde al licor negro. Esta propiedad es

de vital importancia para la modelaciones de los balances energéticos en unidades de evaporación.

4.1.1.7 Conductividad Térmica

Esta propiedad varía en función de la concentración y la temperatura del licor negro, existen modelos para el cálculo de la conductividad como el expresado por Grace y Malcom (1983).

4.1.1.8 Coeficiente de convección del licor negro

Una expresión tradicional para el cálculo de la transferencia de calor en flujos turbulentos completamente desarrollado-como el presente caso- y a través de tubos lisos está dada por la siguiente expresión:

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^n [7]$$

Las propiedades utilizadas en esta ecuación son obtenidas para un valor medio de temperatura del fluido (licor negro) y, el correspondiente valor de “n”, asume valores en los siguientes casos:

- $n = 0,4$, proceso de calentamiento del fluido
- $n = 0,3$, proceso de refrigeración del fluido

4.1.1.9 Aumento del punto de ebullición (BPR)

Una solución acuosa que contiene sólidos disueltos presenta un punto de ebullición mayor que si fuera agua pura, bajo mismas condiciones de presión. La correspondiente diferencia entre el punto de ebullición de una solución y el del agua pura se llama BPR (su cifra en ingles sería, *Boling Point Rising*). Esta propiedad es importante para desarrollar un balance masa, como también, un balance de energía en los evaporadores y /o concentradores.

En el licor negro, el BPR, aumenta significativamente cuando el contenido de sólidos aumenta; en plantas de evaporación puede aumentar desde 1 [°C] a 20-25 [°C] cuando el contenido de sólidos incrementa de 20 a 80 % [8]. Existen diversas correlaciones que pueden predecir el comportamiento del BPR en función de la cantidad de sólidos secos (%), la siguiente Figura 7 resume lo anteriormente expresado:

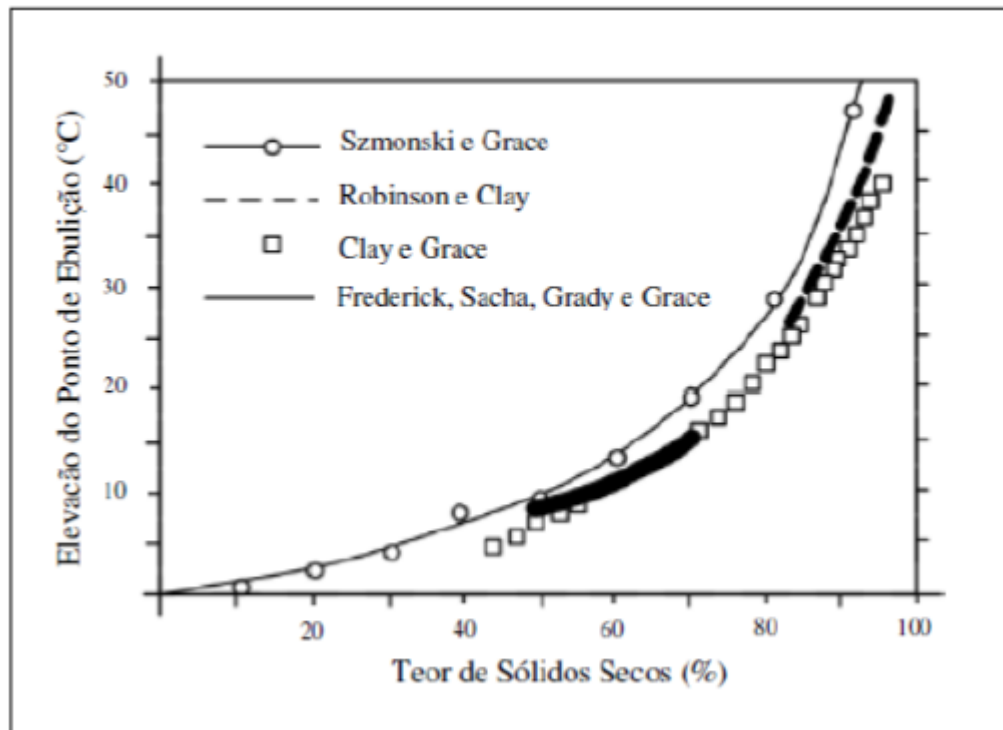


Figura 11. Elevación de la temperatura de ebullición en función de la concentración de sólidos del licor negro [9]

5. Descripción del proceso de concentración de licor

Como se mencionó anteriormente, la unidad de evaporación se encarga (a grandes rasgos) de extraer el agua presente en el licor negro débil mediante la aplicación de calor a través de vapor al sistema. A continuación se presenta en forma detallada la descripción general del proceso.

5.1 Flujo de licor

El licor negro débil con 16-19% de sólidos es enviado desde área de pulpa al área de Evaporadores, a través de un mezclador en donde se le agrega licor grueso de 38-48% de sólidos, posteriormente se almacena en estanques de alimentación con un contenido de sólidos entre 18 y 28 %.

El licor de alimentación es bombeado desde los estanques de almacenamiento hacia el efecto 4. El licor saliente desde el efecto 4 pasa hacia el siguiente efecto, es decir, el efecto 5 y, además, es sometido a recirculación forzada. Posteriormente, el licor saliente ingresa hacia el efecto 6 mediante la bomba 63-J-302. Al igual que en el efecto anterior, el licor se somete a recirculación forzada para alcanzar la evaporación necesaria.

Finalizado el paso por el efecto 6, el licor posee una concentración que está entre 27-37% de sólidos, el cual es almacenado en el estanque de licor intermedio. El licor negro, almacenado en el estanque de licor intermedio, es enviado mediante la bomba J-141-142 hacia el sistema de precalentamiento, el cual consta de cinco Precalentadores: E-38A, E-38, E-58, E-37, E-52 para luego pasar por el desactivador de calcio.

Tras el paso por el desactivador de calcio, el licor fluye hacia el efecto 2 (A y/o B) por medio de la bomba 63-J-673. Luego el licor saliente del efecto 2 ingresa al efecto 3 (A y B) del cual se impulsa, mediante las bombas J-265/266, el licor negro hacia el estanque de almacenamiento de licor grueso, con una concentración entre 38-50 % de sólidos.

Desde el estanque de licor grueso (G-15), el licor es extraído e impulsado por la bomba J-151/152 y conducido hacia los Precalentadores E-26 y E-51. Luego de pasar por los Precalentadores, ingresa al efecto 1; que consiste en cuatro concentradores en serie de tipo película descendente.

El licor saliente del efecto 1 fluye a través de pequeños estanques de expansión, cuya finalidad es regular automáticamente la temperatura del licor, y posteriormente dirigirse hacia el estanque de almacenamiento de licor concentrado, es decir, con una concentración de sólidos entre 62-74 %.

5.2 Flujo de vapor y vahos

El Vapor se inyecta a los evaporadores en el primer efecto o concentradores. La máxima presión es de $3.7 \text{ [kg/cm}^2\text{]}$ y su flujo es controlado mediante válvulas automáticas FIC-105 y FIC-25.1

Ahora bien, los vahos que se desprenden del efecto 1 alimentan la cámara del efecto 2 (A y/o B) y la columna de agotamiento de condensados (*stripper*). Los vahos que ingresan al segundo efecto (A y/o B) transfieren su calor al licor a través del haz de tubos. Este procedimiento se repite en cada uno de los siguientes efectos, de manera que los vahos provenientes del efecto 6 entran a los dos condensadores primarios y al secundario, antes de ingresar a la bomba de vacío.

Los vahos de licor que emanan de los estanques de expansión del licor negro concentrado (C-32/33) son alimentados al cabezal del efecto 4. Los vahos generados en los estanques de expansión del condensado limpio C-34/35 son enviados a las cámaras del efecto 2 B y 3A, respectivamente.

5.3 Flujo de condensados limpios

Básicamente los condensados limpios de vapor vivo provienen desde la serie de concentradores del efecto 1. Dichos condensados son recolectados en recipientes individuales (C-231, C-232, C-233, C-234). Desde estos cuatro recolectores, el condensado se dirige a los estanques de expansión C-34 y C-35 antes de ser enviado directamente al correspondiente estanque general de condensados 84-G-30.

Existe una pequeña cantidad de condensado limpio que se desvía del correspondiente almacenaje con el propósito de eliminar el sobrecalentamiento que pudiera traer el vapor vivo que ingresa a concentradores. Su aplicación se realiza en la cañería de alimentación de vapor a través de la bomba J-356. Con el objeto de eliminar sobrecalentamiento que pudiera traer el vapor vivo que está ingresando a ella.

5.4 Flujos de Condensados Combinados

Los vahos del condesando del efecto 2A que se generan en el estanque de expansión G-253 son enviados a la cámara del efecto 3B. Los condensados combinados de los efectos 2A, 2B, 3A, 3B y 4 se van mezclando sucesivamente en diferentes recipientes de expansión, hasta que finalmente son recolectados en el estanque de expansión G-293 y son extraídos por la bomba J-303, enviándolos al 63-C-21, hot well A-31 ó 72-G-10, según conductividad (0-400 μ s, 400-700 μ s, 700 μ s respectivamente).

Los condensados del precalentador E-38 son mezclados con los condensados provenientes del 3B efecto. Los condensados del precalentador E-38A son mezclados con los condensados provenientes del estanque hotwell C-42 y, a través de la bomba J-391, son enviados al estanque de almacenamiento G-18.

Los condensados generados en los condensadores primarios E-40A y E-40 son retirados mediante la bomba J-296, siendo enviados hacia el estanque de almacenamiento G-18 ó 72-G-10 ó hacia desagüe.

5.5 Flujo de Agua Industrial

El enfriamiento de los vahos en los condensadores primarios E-40A y E-40 y secundario E-41 se obtiene a través del suministro de agua industrial. Una mínima parte de esta agua de enfriamiento alimenta al enfriador E-43 de agua de sello de las bombas de vacío y también alimenta el condensador de vahos desactivados 63-E-68.

El agua que se entibia en estos condensadores se envía hacia el estanque de agua caliente del área Digestores y el agua sobrante es enviada a la torre alpina.

5.6 Columna de agotamiento (Stripper)

Para limpiar los condensados contaminados, la Planta de Evaporación cuenta con una columna de agotamiento, la que utiliza vahos del efecto 1, y eventualmente vapor vivo, como medio de calefacción.

El condensado contaminado del estanque G-18 es bombeado a la columna de agotamiento, ingresando a la altura de la bandeja N°19, mediante la bomba J-181 ó J182. La columna es el tipo de “bandejas con válvulas abiertas”, con un total de 21 bandejas. En cada bandeja el condensado, está en ebullición, debido al paso de los vahos, lo cual permite que el condensado fluya hacia abajo más limpio, y que los vahos emanados de la ebullición asciendan más concentrados en metanol.

Los vahos y gases que fluyen de la parte superior de la columna de agotamiento son condensados en cinco Precalentadores de licor (E-36, E-37, E-51, E-52 y E-58) y un enfriador E-53 a base de agua. Los vahos/gases que salen de este condensador de agua contienen aproximadamente 50% de metanol y sulfuro de hidrogeno. Los condensados que se obtiene en los Precalentadores de licor y en el enfriador de agua son realimentados hacia la parte superior (bandeja N°21) de la columna de agotamiento y una fracción de ellos pueden ser enviados hacia el área 34, mediante la bomba J-571, con el objeto de recuperar trementina.

El condensado desgasificado en la columna de agotamiento es bombeado hacia el 63-C-21, A-31 ó 72-G-10, según su conductividad, desde la parte inferior de la columna, a través del controlador de nivel LIC-50 y la bomba J-501. Este condensado saliente es utilizado, además, para calentar el condensado contaminado entrante al stripper, mediante los intercambiador de calor E-46 ó E-46A.

A continuación se presentan los diagramas de flujo del Área de Evaporadores y la Columna de Agotamiento (Stripper).

Diagrama de flujo Área Evaporadores

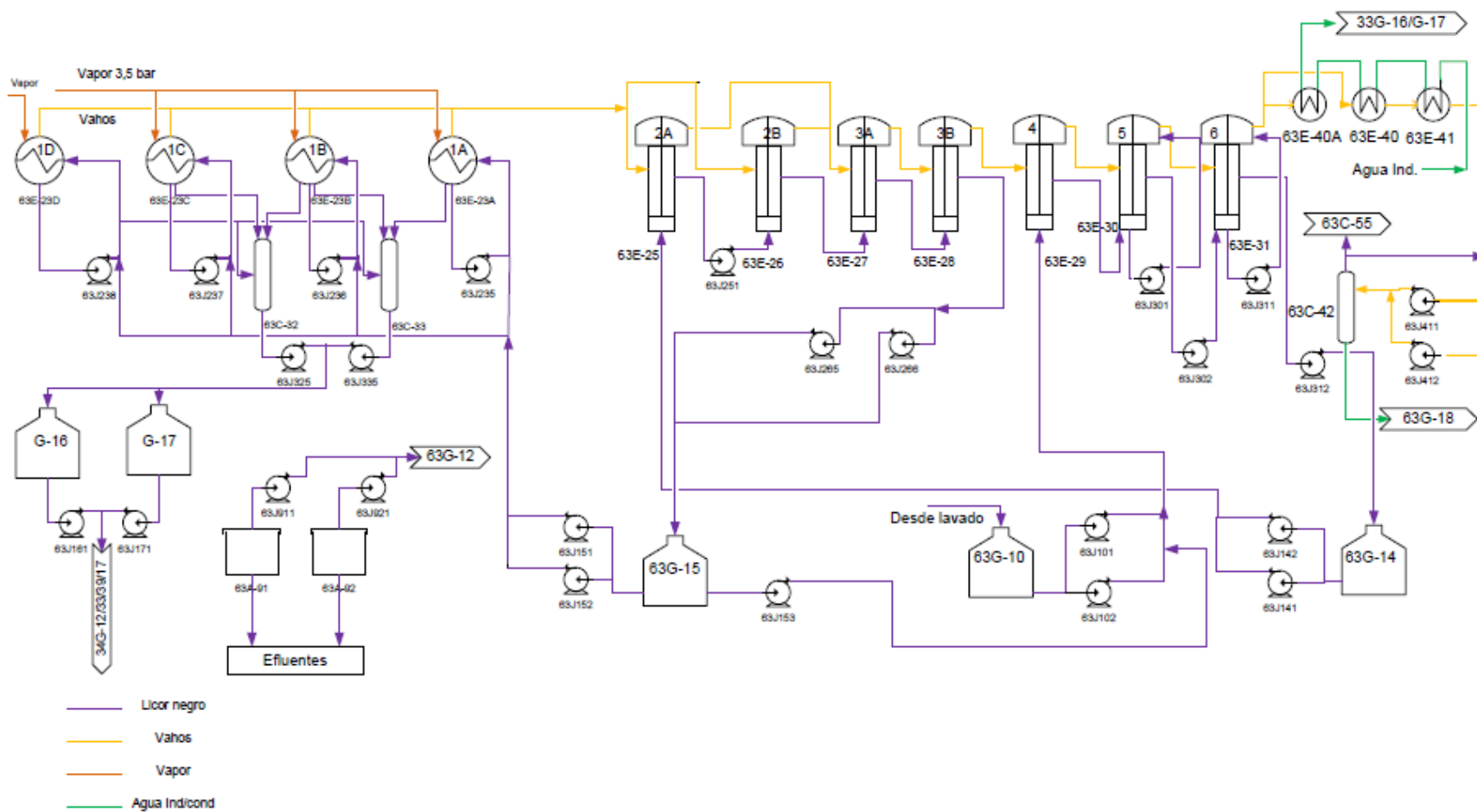


Figura 12. Diagrama de flujo Área Evaporadores simplificado [29]

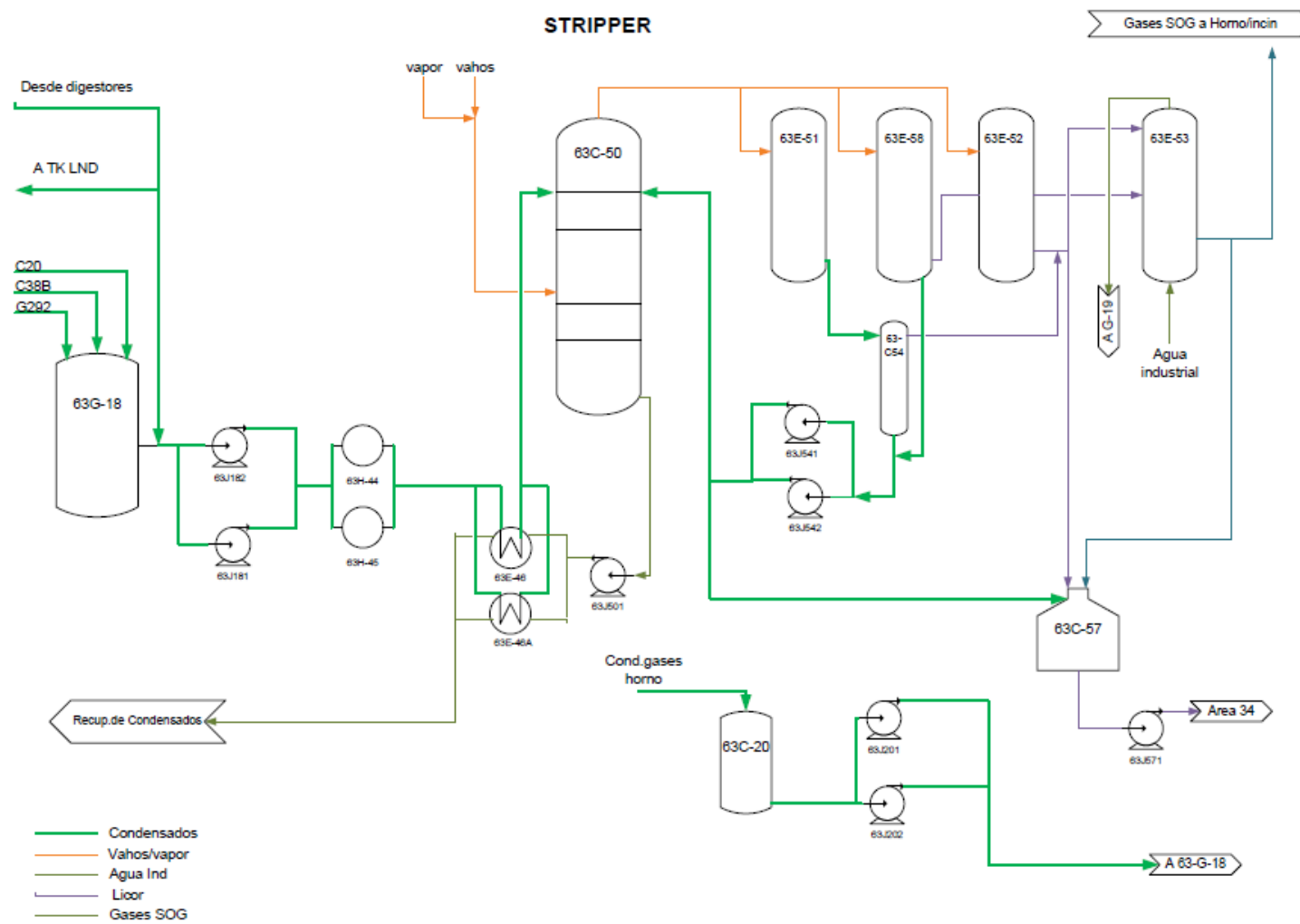


Figura 13. Diagrama de flujo Columna de Agotamiento (Stripper) simplificado [29]

5.7 Listado de equipos Área evaporadores

Tabla 7. Listado de equipos Área Evaporadores (Simplificado)

Nomenclatura	Equipos
Concentradores	
63E-23D	Concentrador 1D perteneciente al primer efecto, de tipo FF y de tubos
63E-23D	Concentrador 1C perteneciente al primer efecto, de tipo FF y de lamelas
63E-23D	Concentrador 1B perteneciente al primer efecto, de tipo FF y de lamelas
63E-23D	Concentrador 1A perteneciente al primer efecto, de tipo FF y de lamelas
Evaporadores	
63 E-25	Evaporador 2A perteneciente al segundo efecto, de tipo RS
63 E-26	Evaporador 2B perteneciente al segundo efecto, de tipo RS
63 E-27	Evaporador 3A perteneciente al tercer efecto, de tipo RS
63 E-28	Evaporador 3B perteneciente al tercer efecto, de tipo RS
63 E-29	Evaporador perteneciente al cuarto efecto, de tipo RS
63 E-30	Evaporador perteneciente al quinto efecto, de tipo FF
63 E-31	Evaporador perteneciente al sexto efecto, de tipo FF
Condensadores	
63 E-40A/40	Condensadores primarios para enfriamiento de vahos
63 E-41	condensador secundario para enfriamiento de vahos
Estanques de Expansión ,estanque de condensado y	
63 C-32/33	Estanques de expansión de licor negro concentrado ubicado en primer efecto
63 C-42	Estanque de recolección de condensados
63 A-91/92	Pozo de recuperación de derrames
Estanques almacenamiento Licor Negro	
63 G-10	Almacenamiento de licor negro débil proveniente de lavado (Digestores)
63 G-14	Almacenamiento de licor negro intermedio
63 G-15	Almacenamiento de licor negro grueso
63 G-16/17	Almacenamiento de licor negro concentrado

5.8 Criterios de disponibilidad del proceso

El área de Evaporadores tiene como objetivo entregar una calidad óptima de licor negro concentrado, con una cantidad de sólidos entre 62%-74%, para ser usado como combustible en la Caldera Recuperadora. Por lo tanto, es de gran interés mantener la mayor disponibilidad operacional posible, la que depende de los siguientes factores.

Dentro de los primeros factores a considerar, están los temas mecánicos y de mantención. En este aspecto es de suma importancia mantener en servicio las bombas de vacío 63-J-411/412, que son las encargadas de entregar la propiedad de vacío a los evaporadores. Además, el mal funcionamiento de éstas bombas produce contaminación en el circuito de condensados y baja concentración del licor negro.

Por otro lado, una mala calidad de licor contempla que los evaporadores y/o concentradores se ensucien tempranamente. La mala calidad se debe, básicamente, a la baja densidad del licor proveniente desde lavado, además, de no cumplir con el rango de temperatura que está entre 80°C-85[°C].

Con respecto a los insumos, el antiespumante es necesario mantener un stock adecuado, debido a las posibles contaminaciones por rebalse de espuma de los estanques de licor.

6. Problemática a estudiar

6.1 Antecedentes

Según información entregada por planta Constitución, la unidad de concentración de licor-en adelante Planta Evaporadores - logra una capacidad de evaporación de alrededor de 270 [t/h] de agua y una concentración de licor negro cercana a los 64-65%. Ahora bien, uno de los principales motivos de la baja de rendimiento corresponden al ensuciamiento de los tubos de los evaporadores, causados por diversos tipos de incrustaciones, como por ejemplo : carbonatos, sulfatos u otros, provocando problemas operacionales de diverso tipo.

Existen antecedentes de que el aumento del ensuciamiento comienza con el cambio de metodología de cocción, es decir, pasar desde un sistema de cocción tipo batch a un tipo de cocción RDH (*Rapid Displacement Heat*) la cual generan excesos de Carbonato de Calcio en el sistema.

Durante el año 2006-2007 (Proyecto GIC 800-J) se realizó una gran modificación a la unidad, ésta consistió en incorporar un nuevo efecto 6 y, además, un desactivador de calcio, entre otros equipos. A fin de solucionar, en parte, las incrustaciones de carbonato de calcio, principalmente en los efectos 2A/2B.

Del 2006 a la fecha, han existido diversas asesorías de asistencia técnica a la Planta de Evaporadores por parte de empresas como Metso, entre otras., de las cuales se realizó un proyecto up-grade, por parte de la Gerencia de Ingeniería y Construcción (GIC). Este proyecto, con data del año 2014, consiste en recuperar la capacidad de evaporación de agua y concentración de licor de la planta de evaporadores existentes hasta su capacidad de diseño, es decir, 330 [t/h] de agua y 75% de concentración de licor.

Desde el año 2014, se han realizado ciertas mejoras en cada parada de planta parcial (PPP) o parada general de planta (PGP) con la finalidad se realizar trabajos de limpieza y/o cambios de

equipos menores. Con respecto a la capacidad de evaporación, ésta sigue alrededor de los 270 [t/h] y la concentración de sólidos alrededor del 64-65%. Según estudios realizados por planta y GIC, los factores principales se deben, en primer lugar, al ensuciamiento de incrustaciones de calcio en tubos, problemas de operación, menor disponibilidad de equipos instalados, otros factores.

Por lo tanto, a continuación, se estudiarán factores que proporcionan pérdida de capacidad de evaporación. En primer lugar, se llevará a cabo el estudio correspondiente al ensuciamiento de evaporadores por el lado del licor negro-objetivo principal de estudio-y, como, su composición, temperatura, porcentaje de sólidos, entre otras variables afectan la cristalización, crecimiento, ensuciamiento y, finalmente, las incrustaciones de: sales ricas en sodio, carbonato de calcio, aluminio-silice, jabón, fibra, etc. en las superficies de transferencia de calor.

6.2 Pérdidas de capacidad de evaporación.

6.2.1 Problemas de ensuciamiento en evaporadores.

La severidad de los problemas de ensuciamiento varían de planta en planta y, por lo tanto, van de a depender de tres factores fundamentales: a) Propiedad del licor, b) diseño del equipamiento, c) operación misma de la planta. Los principales costos asociados a la problemática de ensuciamiento de equipos de transferencia de calor, en especial de evaporadores, son los asociados a la limpieza de éstos. La mayoría de las veces llegan a ser bastante altos.

Problemas asociados al ensuciamiento de equipos de transferencia de calor radican en la precipitación de cristales, los cuales causan severos problemas en los evaporadores cuando el cristal se adhiere a las superficies de transferencia de calor. Este fenómeno recibe el nombre de “*Fouling*” (ensuciamiento) y consiste en la adhesión de cristales suaves, pero, una vez que los cristales que se adhieren a la superficie de transferencia de calor son de carácter duro, este fenómeno pasa a llamarse “*scaling*” (incrustación); y este fenómeno a la larga actuará como un fuerte aislador de la transferencia de calor.

Como se mencionó anteriormente, las características del licor, además, de operación misma tienen fuerte influencia en el origen del ensuciamiento de los equipos; por lo tanto, se comenzará analizando el ensuciamiento del licor negro.

6.2.1.1 Ensuciamiento del licor negro

El licor tiene por composición varias sustancias inorgánicas que facilitan las incrustaciones durante el proceso de evaporación. La composición química del licor negro determina el grado de incrustación y qué tipo de incrustación se formará. Cuando el licor negro alcanza el 50% de sólidos secos la concentración de sulfato de sodio y carbonato de sodio han superado el límite metaestable y las incrustaciones de estas sales de sodio comienzan a formarse [10]. A continuación se muestran las principales sustancias inorgánicas presentes en el licor negro.

Tabla 8. Contenidos de compuestos inorgánicos para algún porcentaje de sólidos secos en el licor negro (%p/p) [11]

	Na	Na ₂ CO ₃	Na ₂ SO ₄	Na ₂ S	Ca (ppm)
Promedio	18.4%	10.0%	6.03%	0.79%	409
Desv. Estándar	1.65%	2.6%	4.18%	0.92%	278

Con respecto a las sales de sodio, existen dos principales incrustaciones de sales de sodio presentes en gran parte de los evaporadores de licor negro industriales, estas son: Burqueita y el Dicarbonato. La primera es una sal doble de composición $2Na_2SO_4 \cdot Na_2CO_3$ cuando cristaliza, y su composición puede variar de 1:3.5 a 1:1 moles de Na_2CO_3 por Na_2SO_4 y, la segunda, también es un sal doble de composición $Na_2SO_4 \cdot 2Na_2CO_3$ y puede variar su composición de 1.5:1 a 3:1 moles de Na_2CO_3 por Na_2SO_4 . A continuación se detallará en mayor profundidad aspectos de cristalización, nucleación y crecimiento de estas dos sales mencionadas anteriormente.

6.2.1.1.1 Ensuciamiento por cristalización de sales solubles de sodio

El ensuciamiento por la deposición de estas sales de sodio ocurre en aproximadamente un tercio de evaporadores y concentradores. Ahora bien, estos depósitos son considerados moderadamente solubles debido a que las sales de sodio son solubles en agua y pueden ser removidos con agua caliente.

En evaporadores y concentradores de licor negro de tipo flujo descendente (*Falling film*), llegan a ser “evaporadores de cristalización” tan pronto como la concentración de sólidos en el licor negro excede el límite de solubilidad de Na_2SO_4 y Na_2CO_3 en este contenido. La deposición de éstas incrustaciones en los evaporadores y concentradores es un problema de cristalización.

Principios de cristalización

La formación y crecimiento de cristales, ya sea en suspensión o como incrustaciones en las superficies, se muestran en la Figura 14. Cuando el agua es evaporada desde el licor negro, las concentraciones de Na_2CO_3 y Na_2SO_4 disueltas alcanzan y, además, exceden su propia solubilidad. Cantidad límite de soluto que puede ser disuelto en el equilibrio termodinámico. La cantidad para el cual la concentración excede el límite de solubilidad se refiere que alcanza el nivel de **supersaturación**. Ahora bien, la supersaturación es necesaria para que ocurra nucleación y el crecimiento de cristales. Una solución supersaturada no es termodinámicamente estable, pero puede mantenerse estable hasta un cierto límite, denominado límite metaestable.

Cuando una solución es concentrada hasta el límite metaestable, la nucleación primaria de cristales ocurre espontáneamente. El límite metaestable no posee un valor termodinámico, ya que depende de diferentes factores, entre ellos: razón de solvente removido, presencia de especies disueltas, partículas suspendidas u otras especies cuando están cristalizando.

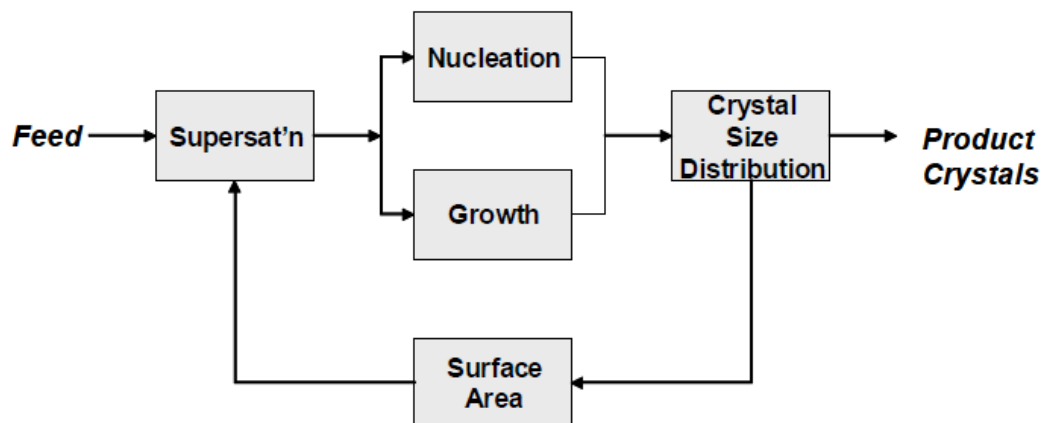


Figura 14. Proceso de formación y crecimiento de cristales [12]

A continuación se muestran, en la Figura 15, los límites de solubilidad y metaestable para las soluciones de Na_2CO_3 y Na_2SO_4 en agua. La región que se encuentra entre el límite de solubilidad y el límite metaestable, se conoce como zona o región metaestable. Las soluciones que se encuentren en esta región apoyarían el crecimiento de cristales o depósitos cristalinos alrededor de cristales ya existentes, pero, no se producirán nuevos cristales por nucleación primaria.

Para muchos solutos, la región metaestable es bastante estrecha, es decir, del orden del 1% de su solubilidad. En la Figura 15 se muestra una región metaestable excedida en un 10 % de la solubilidad del Na_2CO_3 y Na_2SO_4 en agua.

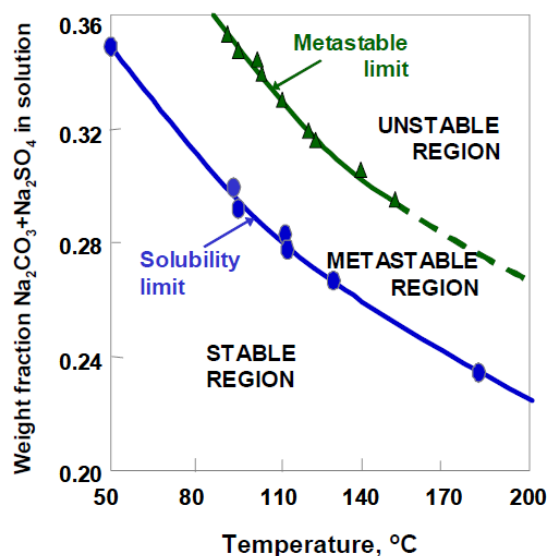


Figura 15. Límites de solubilidad y metaestable versus temperatura para el sistema $\text{Na}_2\text{CO}_3 - \text{Na}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}$. La razón molar es 1:2 [13]

La nucleación primaria ocurre cuando se excede el límite metaestable. Cuando esto ocurre, un gran número de pequeños cristales se forman rápidamente y la concentración del soluto disuelto desciende, típicamente, por debajo del límite metaestable. La nucleación secundaria resulta de una colisión de los cristales y, los nuevos cristales se producen de una forma lenta y estable. Una vez que los cristales o los depósitos cristalinos están formados, estos continuarán creciendo mientras la solución se encuentre supersaturada. Ahora bien, es necesario precisar que no crecerán si la solución se encuentra saturada y, por lo tanto, se disolverán, aunque de forma lenta mientras la solución se encuentre por debajo del límite de solubilidad.

Cristalización de soluciones acuosas.

En evaporadores de licor negro se han identificado incrustaciones de sales de sodio de composición bastante compleja. Por un lado, un compuesto rico en sulfato llamado “Burqueita”; La otra es una sal rica en carbonato, llamado “Dicarbonato”. Las composiciones de estos compuestos pueden variar (como se mencionó anteriormente)

Ahora bien, que especies cristalizan y su composición exacta dependen directamente de las concentraciones de carbonato y sulfato presentes en la solución que cristalizan. A continuación,

en la Figura 16, muestra que cristales se forman para las relaciones de moles en solución acuosa de carbonato de sodio y sulfato de sodio.

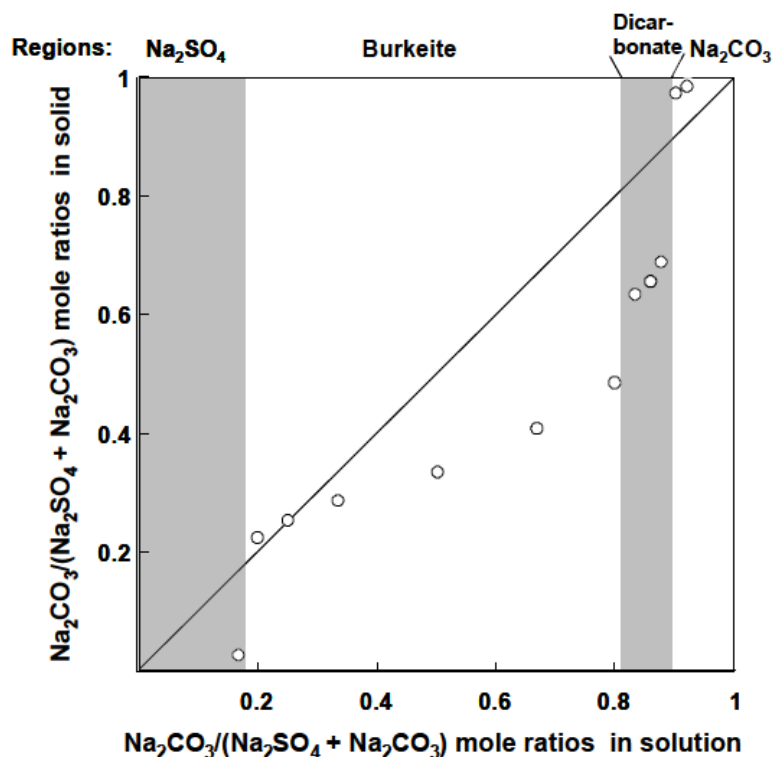


Figura 16.Región de cristales formados a partir de la relación sulfato/carbonato en solución acuosa a 115[°C]. [14]

Durante la evaporación de licor negro, solo la burqueita y dicarbonato son importantes respecto al ensuciamiento [10].Además, ninguna de estas dos especies tiene una composición definida.

Cristalización de licor negro.

Antes de comenzar a analizar la cristalización de licor negro, es necesario indicar el comportamiento de la solubilidad de las principales sales de sodio que precipitan a cierta temperatura en las principales superficies de transferencia de calor. La solubilidad de estas sales es inversamente proporcional a la temperatura, como se muestra en la Figura 17.

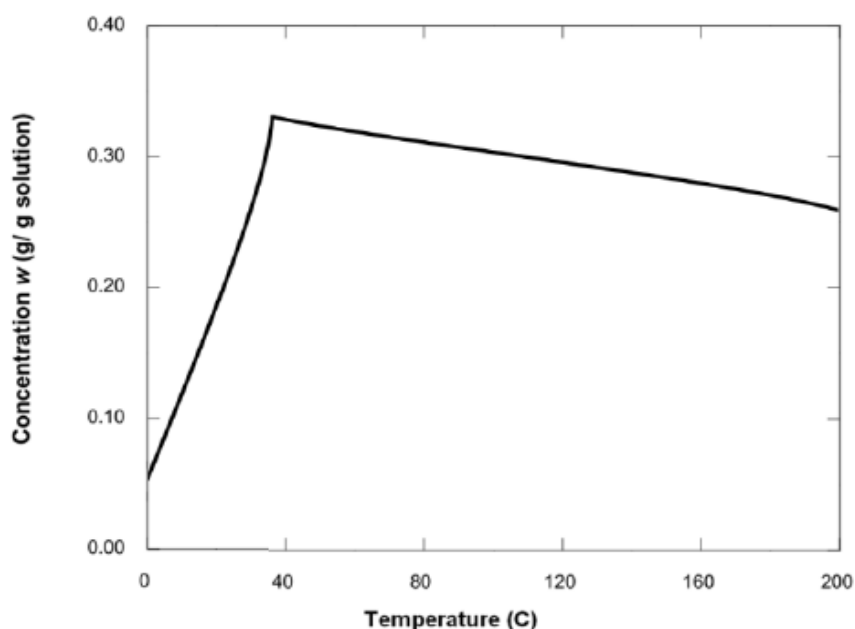


Figura 17. Esquema de la solubilidad de burqueita, sulfato de sodio y carbonato de sodio. [15]

Experimentos se llevaron a cabo al licor negro a una temperatura de 130 [°C]. Los resultados para el licor negro a esa temperatura se muestran en la Figura 18, junto con la cristalización en solución acuosa mencionada anteriormente. Ahora bien, en comparación a la anterior, existe una región adicional, es decir, entre $0.68 < x_{Na_2CO_3} < 0.82$ tanto la burqueita y el dicarbonato son identificados en una región.

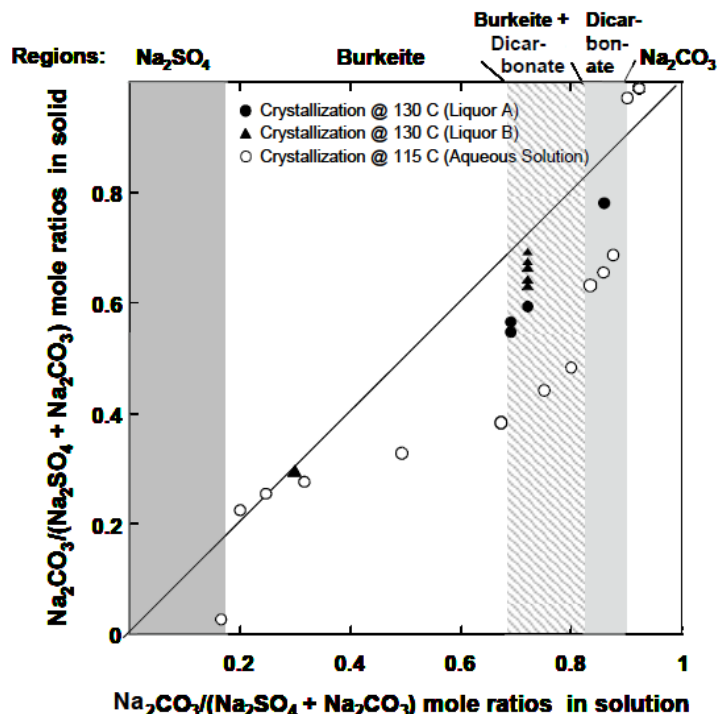


Figura 18.Comparación de las composiciones de los cristales obtenidos en la cristalización de licor negro a 130 [°C] y la solución acuosa a 115 [°C] [15]

Las regiones donde el dicarbonato y ambos, dicarbonato y burqueita, se encuentran en fase cristalina son de suma importancia para los evaporadores industriales en Plantas de Celulosa. Cerca del 60% de lo evaporadores poseen este tipo de problemas [11].Con respecto al licor negro débil (LND) la composición estará en el rango de $0.68 < x_{Na_2CO_3} < 0.89$ a medida que la concentración de sólidos aumente, es decir, cercano al 70 % de sólidos, la cantidad de sales disueltas se moverá hacia la región de la formación de Dicarbonato.

A continuación, en la Figura 19, se muestra un gráfico con las dos especies mencionadas anteriormente, en la cual se muestra la relación de la razón o ratio másico Na_2CO_3/Na_2SO_4 en los sólidos del licor negro (*Black liquor solids*) y el contenido total de sólidos. Como se aprecia en la Figura 19, existen regiones donde puede cristalizar una especie o ambas especies simultáneamente. La cantidad cristalizada depende en gran medida de la razón carbonato/sulfato en el licor negro. Altas razones de carbonato/sulfato en el licor negro cristalizaciones de dicarbonato, mientras que para bajas razones de carbonato/sulfato cristalizaría burqueita. La

región intermedia en el gráfico presenta que ambas especies cristalizan durante la evaporación. Ahora bien, los cristales pueden cambiar de burqueita a dicarbonato debido, principalmente, a que la burqueita es rica en sulfato; como se cristaliza la burqueita, el sulfato es removido más rápido de la solución que el carbonato y, por lo tanto, las sales disueltas restantes se vuelven más ricas en carbonato.

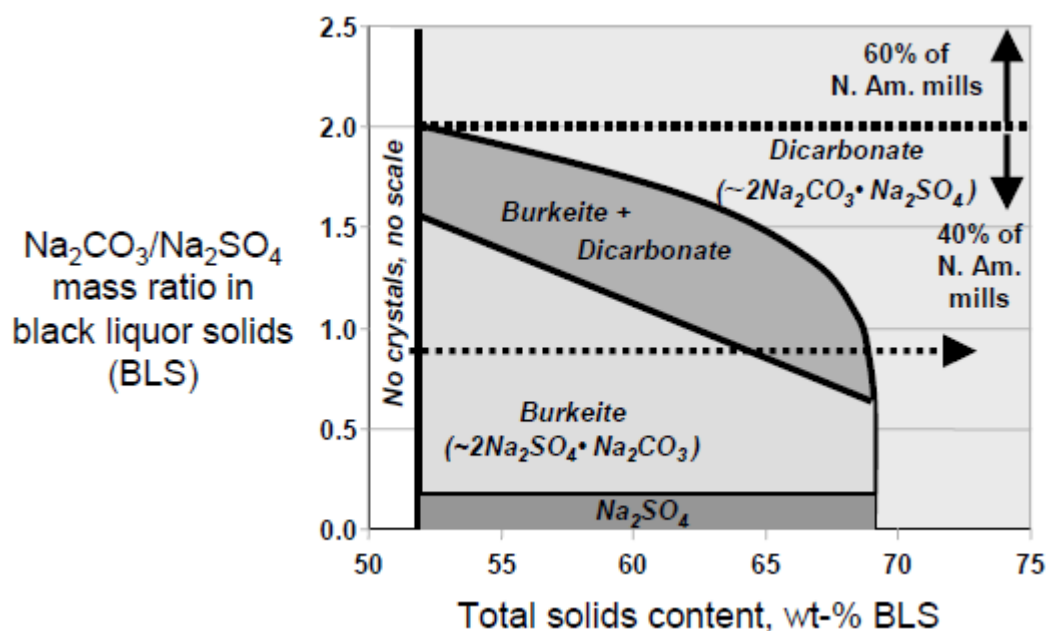


Figura 19. Cristales y tipos de incrustaciones. [16]

Para comenzar un control efectivo de las incrustaciones de sales de sodio en los evaporadores de licor negro, se debe saber, en primera instancia, que especie está cristalizando. Información recabada de 29 plantas diferentes de pulpa de celulosa kraft en Estados Unidos indican que, en el 40 % de ellas, la burqueita o una mixtura de burqueita y dicarbonato cristalizan primera cuando el licor es concentrado, pero, finalmente, el dicarbonato puede eventualmente ser cristalizado. En el otro 60 % de las plantas, el dicarbonato cristaliza primero.

Además de conocer el comienzo de la cristalización para poseer un control sobre la formación de incrustaciones, es necesario conocer cuando ocurre la transición de burqueita a dicarbonato. Una forma de conocer el inicio de la formación de incrustaciones (Precipitaciones) es conocer el límite de solubilidad el cual corresponde al “contenido de sólidos críticos” (CSC) que se calcula de la siguiente forma, según Adams [17]:

$$CSC(\%) = \frac{100}{1 + 6.18(Na)^{0.365} \cdot (Na_2SO_4)^{0.323} \cdot (Na_2CO_3)^{0.131}}$$

Las concentraciones están expresadas en fracciones en peso de los sólidos secos del licor negro.

El contenido de sólidos típicamente está aproximadamente alrededor de 50 % a 55% y, el punto de cristalización está alrededor de 1-5 % sobre este porcentaje de sólidos críticos [16].

Ahora bien, la transición de burqueita a dicarbonato es más difícil de predecir y, además, se requieren métodos de cálculo avanzado.

Además del ensuciamiento por cristalizaciones de sales de sodio solubles como la burqueita y el dicarbonato, existen sales insolubles como por ejemplo: Carbonato de calcio, sales de silicio (SiO_2), aluminosilicatos, etc. Las incrustaciones de calcio son las más comunes dentro de las especies de sales insolubles y se estudiarán en detalle a continuación.

6.2.1.1.2 Ensuciamiento por sales insolubles

Sales insolubles de calcio.

Según Shi et al [18] en sus trabajos ha explicado que pequeñas cantidades del ion calcio (Ca^{+2}) actúan como inhibidores de cristales de burqueita y dicarbonato. Ahora bien, es usualmente encontrar incrustaciones en forma de $CaCO_3$ en evaporadores; las cuales son poco solubles en aguas y en soluciones alcalinas y en altos contenidos de sólidos secos, donde estas sales de sodio están más concentradas. Por otro lado, el carbonato de calcio puede co-precipitar con el carbonato de sodio en forma de una sal doble llamada Pirsonita, la cual es parcialmente soluble en agua.

Los depósitos de estos tipos de incrustaciones son de color marrones, alrededor del 20% de calcio y, además, se disuelven en ácido.

El calcio presente en el licor negro presenta baja solubilidad, alrededor de 50 ppb (microgramo/kg), además, debería precipitar inmediatamente en el licor negro por su alto contenido de ion carbonato (CO_3^{-2}), sin embargo, los orgánicos presentes en el licor negro permiten niveles muchos más altos de calcio disuelto. Ahora bien, es difícil mantener o mejor dicho limitar los niveles de calcio en el licor negro, ya que, la mayoría de este proviene desde los chips de madera. El contenido típico de calcio disuelto en el licor negro es de alrededor de 200 a 2000 ppm (mg/kg en BLS) y, además, es necesario indicar que el calcio soluble proviene de la madera y no de la cal.

A continuación se describe el mecanismo por el cual el Calcio disuelto en el licor negro es convertido en incrustación.

- Altas temperaturas descomponen o rompen los enlace Ca-orgánico.
 - Ocurre cerca de las superficies de transferencia de calor
 - El ion calcio es liberado (Ca^{+2}) y se combina con el CO_3^{-2} , formando el depósito de CaCO_3 .
- La temperatura típica a la que ocurre este fenómeno es cercana a los 120 [°C].
 - Puede ocurrir a menor temperatura, es decir, a 104 [°C] en sistemas de cocción RDH (*Rapid displacement heat*) cómo es el caso de Planta Constitución.

La Figura 20 muestra el mecanismo de incrustación de calcio. Como se mencionó en el punto anterior, en plantas que ocupan sistemas de cocción RDH los problemas de incrustaciones son más severos. En dichas plantas, el ensuciamiento sucede a bajas temperaturas e inclusive cuando el licor alcanza valores bajo los 100 [°C] [19].

Mechanism of Ca Scale Deposition

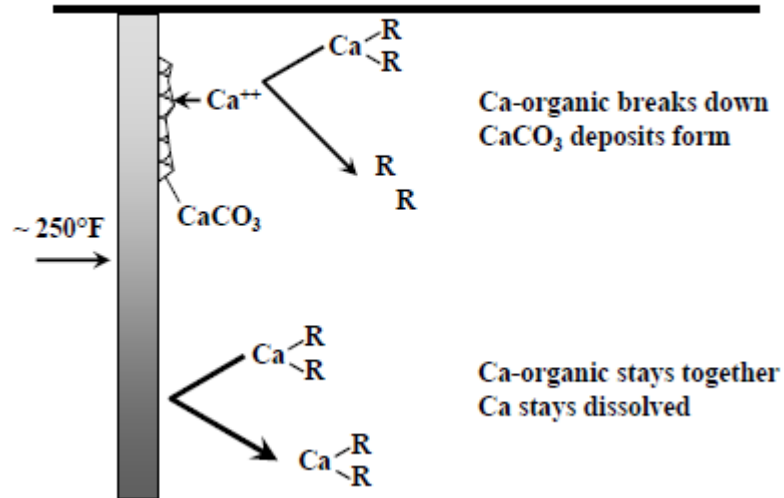


Figura 20. Mecanismo de Deposición de Calcio [17].

Existen formas de reducir el calcio en los evaporadores, las cuáles se nombran a continuación:

- Limitar presión a los evaporadores
 - Presión máxima de 30 -35 [psig], aproximadamente.
- Mejorar eficiencia de separación de jabón del licor
 - El jabón contiene grandes cantidades de calcio soluble disuelto.
- Mejorar el descortezado.
- Desactivación térmica.

Sales insoluble Aluminio-silicio.

El ensuciamiento de estas sales es poco frecuente, pero son bastante problemáticas cuando ocurren. Este tipo de incrustaciones son delgadas, pero, persistentes y difíciles de eliminar. La mayoría de las veces son encontradas en efectos finales de concentración de licor, es decir, en concentradores propiamente tal, y su cantidad está determinada por las concentraciones de aluminio y silicato [15].

Además de las sales, tanto inorgánicas y orgánicas, el licor negro contiene otras especies que contribuyen al ensuciamiento, estas son el **jabón y la fibra**.

6.2.1.1.3 Ensuciamiento de otras especies presentes en el licor: Jabón, Fibra, lignina.

Alrededor del 0.85% p/p del contenido del licor negro es Jabón residual [11]. El jabón se incorpora a la red cristalina de las incrustaciones (de sales solubles o insolubles) cuando éstas se adhieren a las superficies de transferencia de calor; lo que se traduce en mejorar el grado o razón de ensuciamiento. Por otro lado, el jabón contiene contenido de calcio disuelto y fibra, los cuales, como se mencionó anteriormente, contribuyen al ensuciamiento. Su control se basa en controlar las otras especies incrustables, además de tener una buena espuma de jabón lo que favorece una mejor separación del licor.

Otro agente causante de ensuciamiento es la fibra, aunque no es considerado un agente de ensuciamiento primario como las sales de sodio o calcio, sí puede causar efectos de taponamiento en tubos de evaporadores y/o concentradores de licor negro. La fibra puede formar esteras en aquellas efectos donde el contenido de sólidos aún es bajo, además, la fibra suele depositarse o concentrarse en zonas estancadas. Ahora bien, el ensuciamiento de fibra en unidades de evaporación de tipo *Falling film* se resumen a continuación [16]:

- Las aglomeraciones de fibra y posterior taponamiento suceden en la abertura del revestimiento del distribuidor de licor negro.
- Causa mala distribución de licor negro.

La instalación y mantención de un filtro de fibra ayudará a mantener el contenido de fibra en el licor menor a 100 [ppm] hacia evaporadores.

Finalmente, existe el ensuciamiento del contenido de lignina presente en el licor. Principalmente se da por la precipitación de ésta, la cual es altamente dependiente al pH del licor negro, aunque es necesario precisar que al ser dependiente del pH del licor, estos tipos de ensuciamientos son fáciles de controlar y se dan con pocas frecuencias en plantas de celulosa [16]. Una de las maneras más simples de reducir este tipo de ensuciamiento es mantener altos flujos sobre las superficies

de transferencia de calor. Otra forma es mantener el pH del licor sobre 12 [16], además de preocuparse del control del álcali efectivo residual desde digestores.

7. Evaluación Operacional

7.1 Evaluación de posibles causas de ensuciamiento prematuro.

Con respecto a la evaluación de las causas posibles de ensuciamiento prematuro de concentradores, es necesario recalcar que, dentro del presente estudio, se realizó en primer lugar, el análisis de las causas estudiadas teóricas que pueden ocasionar el ensuciamiento prematuro de concentradores y comparar su valor teórico con los correspondientes valores reales analizados en Planta Constitución. Se estudiarán una serie de posibles causas que podrían generar ensuciamiento en los evaporadores; dichas causas, una vez estudiadas, indicarán el efecto que causan en el proceso de evaporación, es decir, efecto inmediato no prolongado en el tiempo, efecto inmediato prolongado en el tiempo o ningún efecto.

Es necesario indicar que el análisis de evaluación de causas de ensuciamiento prematuro se realizó investigando el comportamiento, solamente, del concentrador 1D, a modo de simplificar la investigación y, además, dicho concentrador posee la mayor Área de transferencia de calor dentro de la planta evaporadores, lo que indica que cambios significativos en él, representarán en gran medida el comportamiento del resto de los evaporadores y/o concentradores de licor negro. Finalmente, gran parte del análisis realizado en la presente investigación se llevó a cabo para el año 2015, debido a que, fue un año que mostró significativos cambios en el porcentaje de sólidos de licor negro concentrado, producto, principalmente, de una menor capacidad de evaporación debido a mayores razones de ensuciamiento de las zonas de transferencia de calor. A continuación en la Figura 21, se muestra el impacto que tiene una baja sostenida del porcentaje de sólidos presentes en el licor negro concentrado (LNC), producto de mayores razones de ensuciamiento, en el negocio secundario de las plantas de celulosa, es decir, la producción y venta de energía.

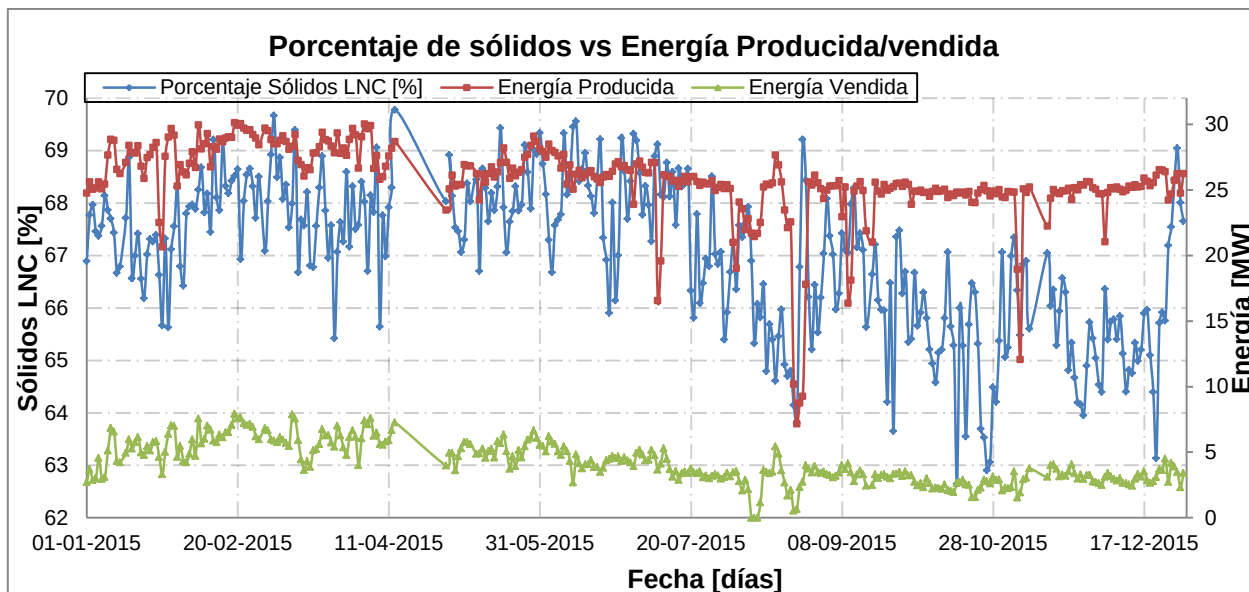


Figura 21. Variación del porcentaje de sólidos en LNC y su efecto en la energía producida/vendida.

Como se aprecia en la Figura 21, una baja sostenida del porcentaje de sólidos presentes en el licor negro concentrado, repercute significativamente en la producción y venta de energía. Si bien es cierto, el negocio principal de una planta de celulosa no es la venta de energía al sistema interconectado, es un punto a considerar en cualquier planta de celulosa. El presente trabajo busca determinar las posibles causas que generan el ensuciamiento y, también, poder tomar medidas para mitigarlas, a fin de que éstas tengan el menor impacto posible, en primer lugar, en la producción de celulosa y, en segundo lugar, en la producción y venta de energía eléctrica.

Para comenzar el correspondiente el análisis de posibles causas, es necesario precisar que, como hipótesis relacionado al efecto de ensuciamiento en evaporadores, la precipitación de sales de sodio, específicamente, sales dobles de sodio, serán la principal agente causante del ensuciamiento en evaporadores y/o concentradores. Ahora bien, es necesario estudiar otras causas probables que, según los antecedentes previos, podrían ocasionar efectos de ensuciamiento a fin de descartarlas de plano o tenerlas en consideración para realizar un seguimiento más acabado. Por lo tanto, se comenzará con el análisis de causas distintas a la precipitación de sales de sodio, a fin de ser consideradas o no como agentes de ensuciamiento en las superficies de transferencia de calor en evaporadores y/o concentradores.

7.1.1 Evaluación causas propias del área evaporadores.

En primera instancia, tras conocer el proceso general de producción de celulosa en Planta Constitución, se comenzó por realizar un análisis interno del área evaporadores, con la finalidad conocer el funcionamiento interno del área y, también, poder relacionar lo presentado en el capítulo de antecedentes con el accionar real del proceso en Planta Constitución.

7.1.1.1 Presión de trabajo. Vacío final tren evaporadores

Si bien es cierto, el análisis del ensuciamiento prematuro de concentradores se ha realizado por el lado del licor, es necesario indicar la importancia de mantener el rango operacional de esta variable con la finalidad, en primer lugar, de cumplir los objetivos del área y, en segundo lugar, evitar el ensuciamiento de los concentradores por pérdidas de vacío. Principalmente por fallas de las bombas 63-J-411/412.

A continuación, en la Figura 22, se muestra el comportamiento del vacío final del tren evaporadores y su relación con el ensuciamiento del concentrador 1D.

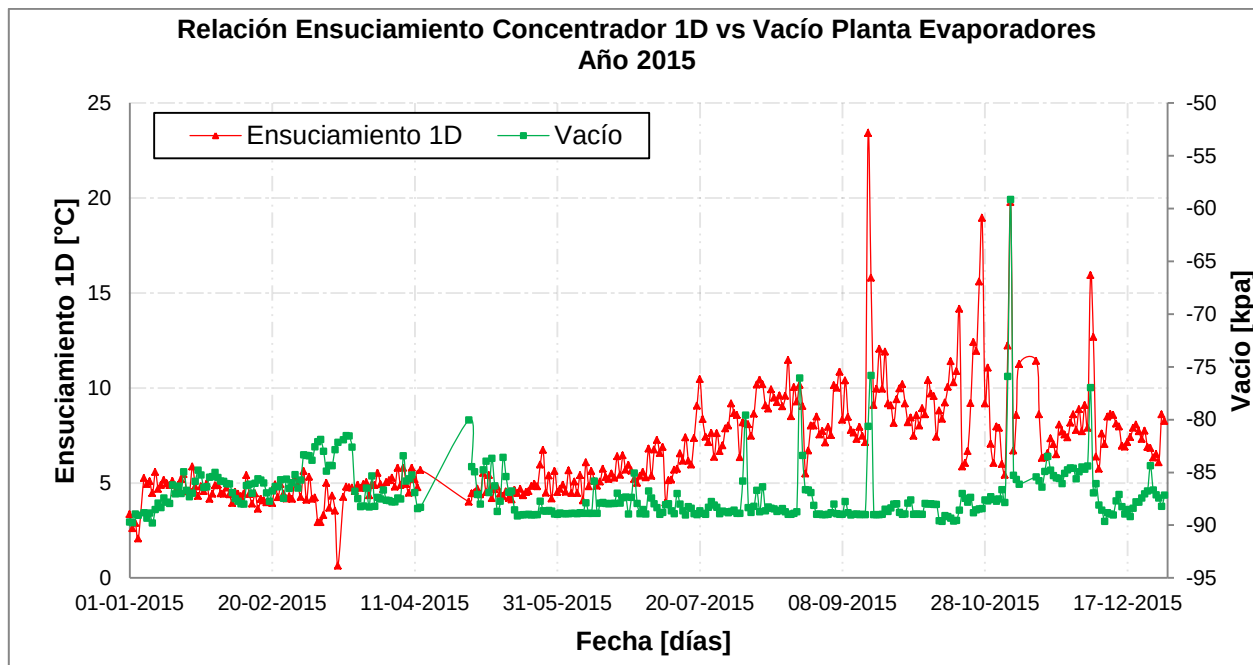


Figura 22.Efecto de variaciones de vacío del tren de evaporadores.

Al apreciar la Figura 21, se aprecia que las mayores fluctuaciones en los valores de la diferencia de temperatura de licor de salida del concentrador y el vapor de entrada o llamada en planta como “Ensuciamiento” alcanzan “peaks” en fecha puntuales, logrando coincidir con problemas de pérdida de vacío del tren de evaporadores, el cual debe comprender el rango de [-92-(82) kpa] [21].

7.1.1.2 Eficiencia separación jabón-licor.

Es necesario indicar que los componentes presentes en la madera consisten en Celulosa, Ligninas y Hemicelulosa, sino también los llamados extractivos, que incluyen grasas y ácidos, y estos componentes se deben separar del licor negro. Un extractivo perjudicial, en el caso que no se separe adecuadamente del licor, es el jabón. Existen tecnologías de separación de jabón llamadas “skimmer” o desnatadora, el cual ayuda a controlar la formación de espuma y posterior ensuciamiento en las plantas de evaporadores. En Planta Constitución no existe tecnologías de skimmer en los estanques de almacenamiento de licor negro (63-G-10/11/12/14), sino más bien, la separación jabón licor se realiza por diferencia de densidad entre el jabón y el licor, capturando por la parte superior el jabón (menos denso) y enviado a su correspondiente almacenaje en el estanque 63-G-13, para ser procesado en la planta de producción de Tall-Oil. A continuación en

la Figura 23, representa la relación entre la separación, por diferencia de densidad, jabón-licor y el ensuciamiento del concentrador 1D.

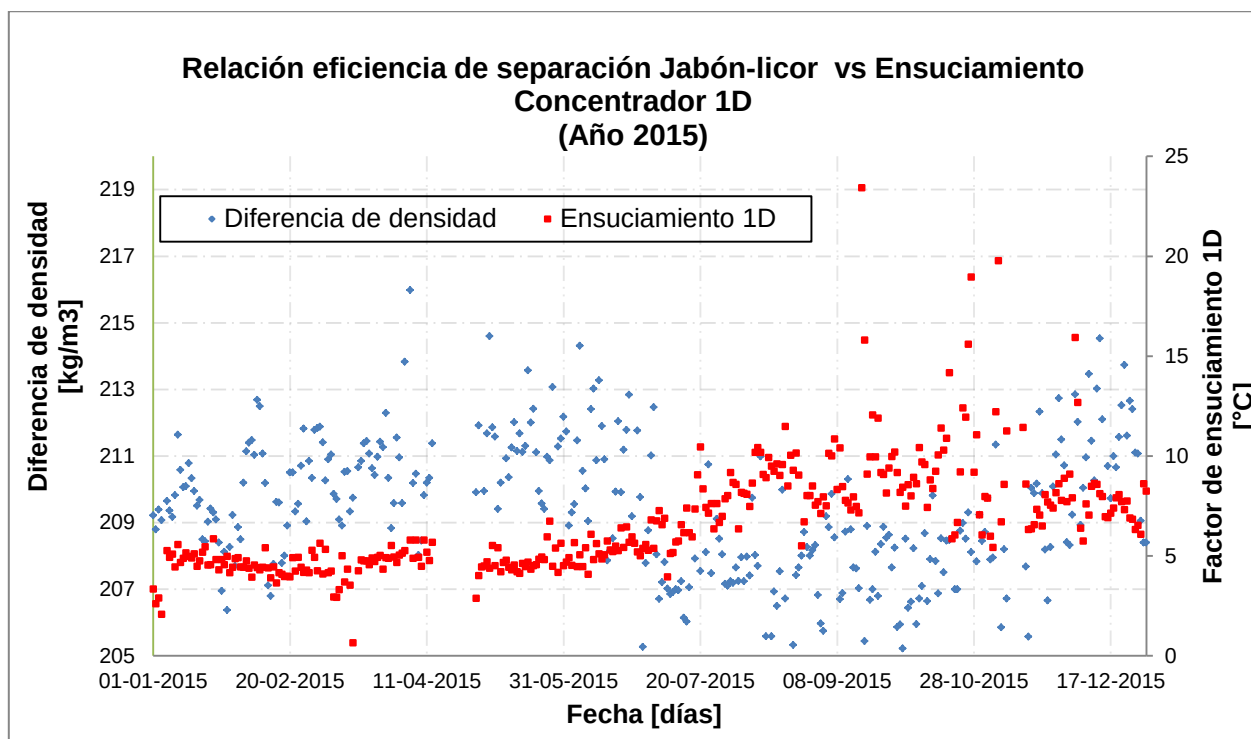


Figura 23.Efecto eficiencia de separación Jabón-licor.

Al analizar la correspondiente Figura 23, se aprecia que, a partir el punto de inflexión del aumento sostenido del ensuciamiento, la diferencia de densidad entre el licor y el jabón comienza a disminuir, lo que se traduce en dificultad de separación de ambos compuestos. Ahora bien, la tendencia es poco clara y se ha descartado, debido, principalmente, a que se consideró aproximadamente constante la densidad del jabón presente en el licor ante la dificultad de medir este parámetro en planta.

7.1.2 Evaluación causas ajenos del área evaporadores.

7.1.2.1 Causticidad

Para poder analizar efectos que pueden fomentar el ensuciamiento de concentradores por parte del licor, es necesario conocer cómo se comporta la relación de transformación de carbonato de sodio a hidróxido de sodio en el licor blanco clarificado o Causticidad. La Causticidad posee directa relación con el carbonato de sodio que no se transforma o remanente que va en el licor blanco clarificado que va a cocción y, posteriormente, llega a planta evaporadores y, por supuesto, será de importancia conocer cómo se comporta este proceso, debido a que el carbonato de sodio remanente influye en la razón carbonato/sulfato que se analizará en capítulos posteriores y ayudará a determinar en qué posible región precipitarán las correspondientes sales de sodio.

A continuación, en la Figura 24, se muestra la relación indirectamente proporcional que existe entre la causticidad y el carbonato de sodio (ambas variables medidas del licor blanco clarificado).

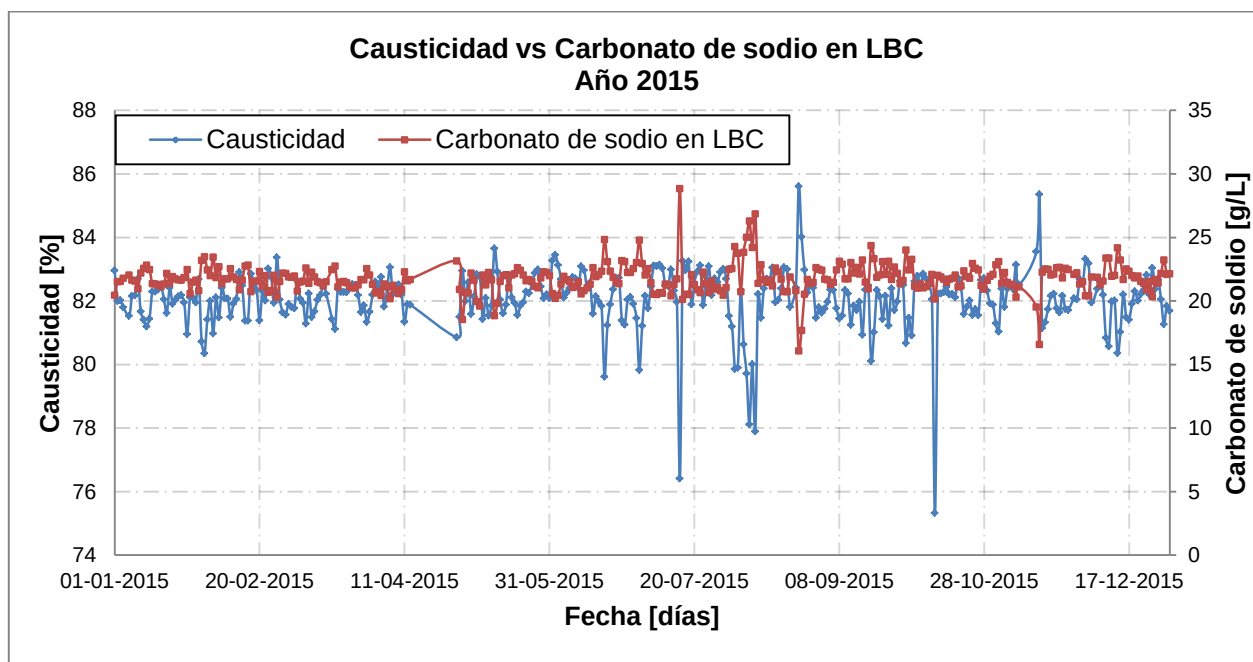


Figura 24. Relación Causticidad-Carbonato de sodio medido en el licor blanco clarificado (LBC)

Al observar la Figura 24, se aprecia la relación inversamente proporcional entre ambas variables. A continuación, se elegirá la causticidad para realizar el correspondiente análisis entre dicha variable y el ensuciamiento del concentrador 1D.

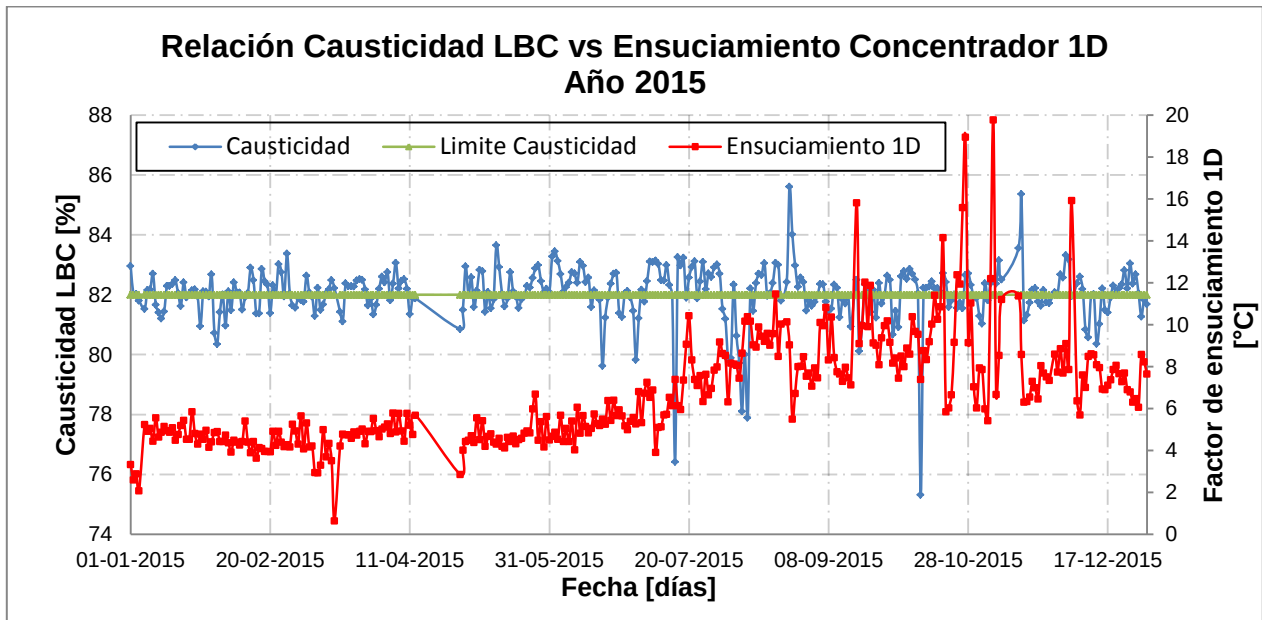


Figura 25.Efecto Causticidad licor blanco clarificado

Al observar la correspondiente Figura 25, se aprecia que, en gran medida, la causticidad permanece cercano al rango planta, es decir, 82%. Ahora bien, valores de causticidad bajos o abruptamente bajos indicarán –tal como que se indicó en informes de asesorías de la empresa Valmet S.A- una repercusión en el área de evaporadores 5 a 10 días tras la baja abrupta en el porcentaje de causticidad. Por lo tanto, si bien la causticidad influye en el proceso de evaporación, específicamente, en la razón de ensuciamiento, su efecto sería de carácter puntual y no representaría la tendencia de aumento de la razón de ensuciamiento del concentrador 1D.

7.1.2.2 Análisis granulométrico.

El análisis granulométrico es realizado, en planta, por el laboratorio central de Planta Constitución, perteneciente a la Superintendencia de Control Técnico. Dicho análisis es realizado a la astilla que ingresa a la alimentación de los digestores, para su posterior cocción. Es necesario precisar que, dicha astilla, es una mezcla entre astilla de proveedores externos y astilla interna. La mezcla va a depender de que calidad se desee obtener.

Se estudiaron, principalmente, dos variables de interés que podrían tener relación con el ensuciamiento prematuro de concentradores: El contenido de humedad de la astilla y la cantidad de corteza presente en las astillas que va a proceso de cocción. La primera variable es necesaria para conocer el contenido de agua y su distribución en la astilla que ingresará a cocción y, conocer que implicancia posee tener astilla con mayor o menos humedad y su repercusión en el ensuciamiento de concentradores. Por otro lado, el control de la corteza remanente en las astillas es importante, debido a que, la corteza posee grandes cantidades de calcio, lo que fomenta la formación de carbonato de calcio (agente incrustante) y, además, no favorece un proceso óptimo de cocción. El calcio al someterse a temperatura de cocción puede formar carbonato de calcio y, posiblemente, dicho compuesto ser arrastrado hacia etapas posteriores, es decir, hacia planta evaporadores [22].

A continuación, se muestra el comportamiento de éstas dos variables y su relación con el ensuciamiento del concentrador 1D.

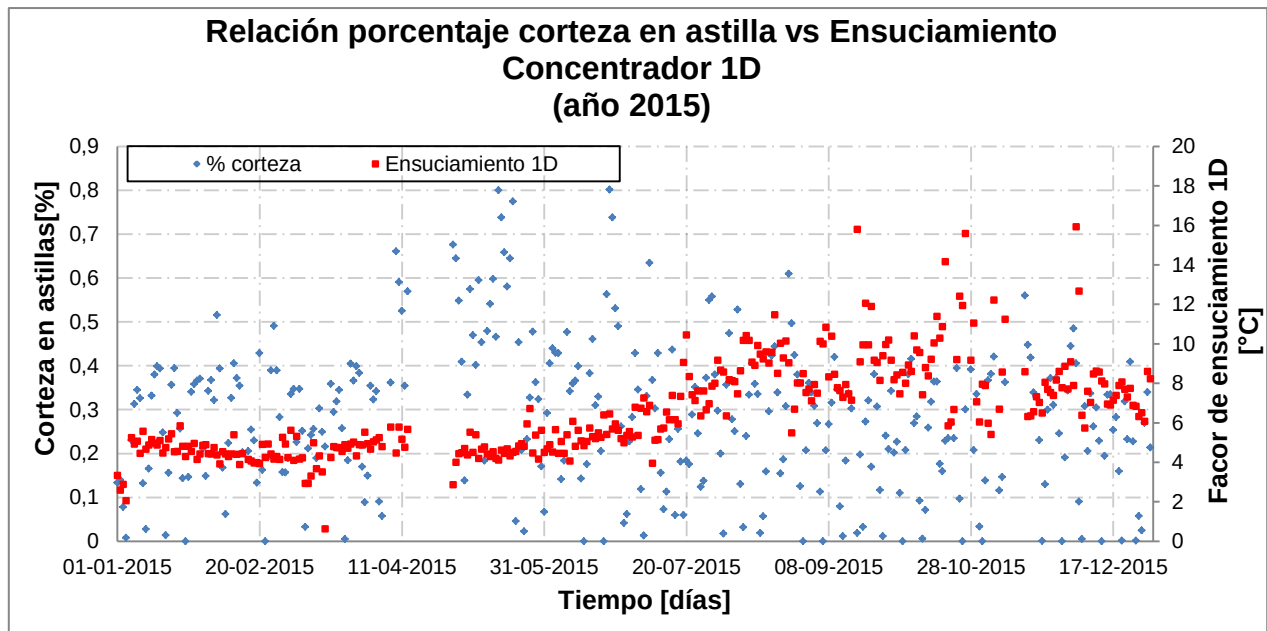


Figura 26.Efecto de corteza en la astilla.

Se aprecia, en la Figura 26, a priori, la poca relación entre el contenido de corteza remanente presente en la astilla y el ensuciamiento prematuro de concentradores. Esto debido, básicamente, al buen descortezado realizado en preparación madera (astilla interna) y, por otro lado, al control de la corteza presente en la astilla externa. Por lo tanto, no existiría relación con el ensuciamiento de concentradores.

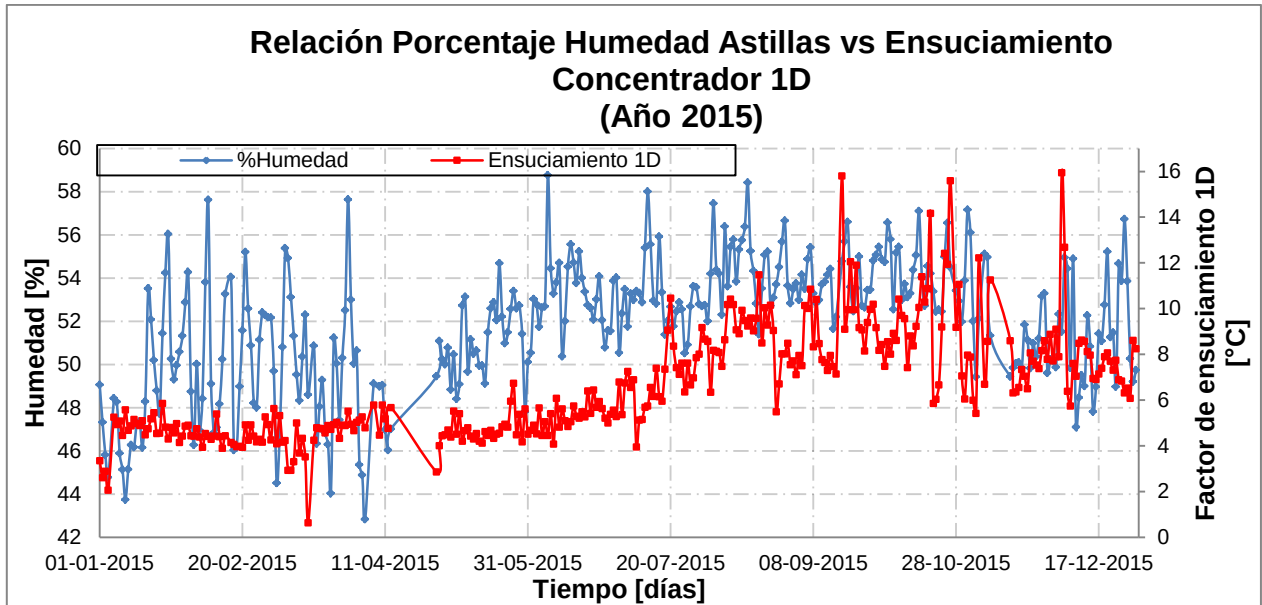


Figura 27.Efecto de humedad en la astilla

Al observar la Figura 27, el contenido de humedad no representa ser una variable que indique ser, en alguna medida, la responsable del aumento sostenido del ensuciamiento en evaporadores, debido, principalmente, a que durante el periodo de inflexión (fines de julio) en evaporadores, el comportamiento de la humedad es estable y prácticamente durante todo el periodo invernal permanece constante. Por lo tanto, al igual que la corteza presente en la astilla que va hacia digestores, no representan efecto alguno en el ensuciamiento de evaporadores.

7.1.2.3 Contenido de Fibra en el Licor.

A pesar de que la fibra no es un agente de incrustación primario, si puede causar problemas complejos en el caso de que opere insatisfactoriamente el filtro de fibra o denominado 33-Q-30, perteneciente al área de pulpa en Planta Constitución. La fibra al incrustarse en evaporadores y/o concentradores, causa mala distribución del flujo de licor negro. Es por esto que los niveles de fibra hacia evaporadores deben ser inferiores a 100 [ppm][22].

A continuación, en la Figura 28, se grafica el comportamiento del contenido de fibra hacia evaporadores durante el año 2015 y su influencia en el ensuciamiento de evaporadores.

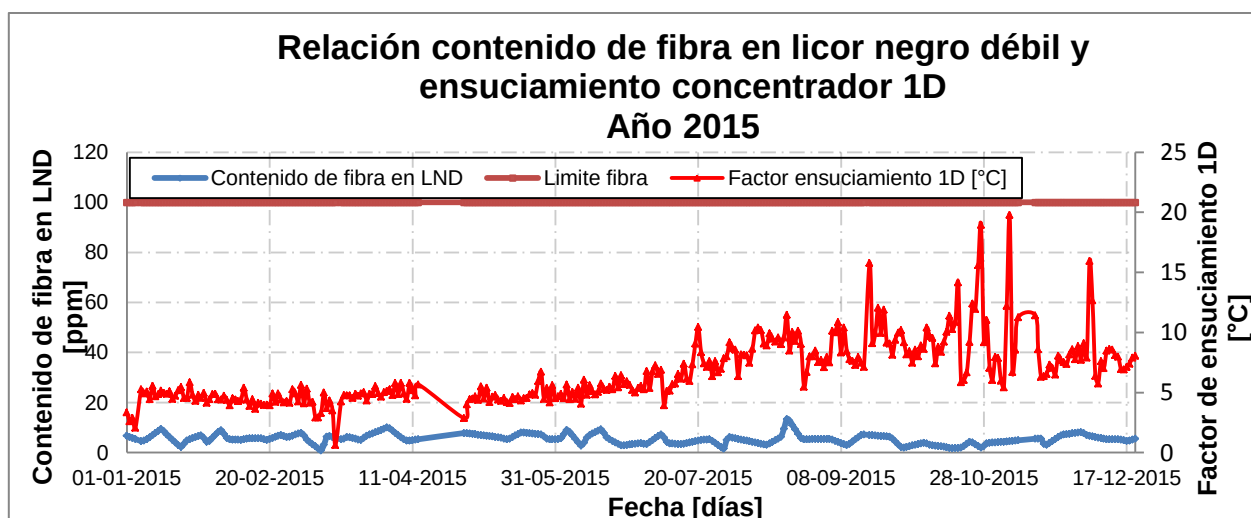


Figura 28. Contenido de fibra en LND y su relación con el ensuciamiento.

Al apreciar la Figura 28, el contenido de fibra es bastante inferior al indicado en la bibliografía correspondiente debido, en gran medida, al correcto funcionamiento del filtro de fibra 33-Q-30 del licor de lavado o licor negro débil que, posteriormente, irá a proceso a planta evaporadores. Por lo tanto, para mantener el contenido idóneo de fibra en el licor es necesario un correcto filtrado. Finalmente, el contenido de fibra presente en el licor negro débil que va a proceso de evaporación se mantiene dentro de los márgenes establecidos y, además, no repercute en el efecto de ensuciamiento.

7.1.3. Teoría de ensuciamiento por precipitación de sales de sodio.

Antes de analizar la principal hipótesis de ensuciamiento referida al ensuciamiento por precipitación de sales de sodio, se estudiaron algunas causas probables típicas que podrían ocasionar problemáticas de ensuciamiento en evaporadores de licor negro. Dichas causas no reflejaron ser, en gran medida, las que provocan el aumento sostenido, a partir de fines de julio del año 2015, del ensuciamiento en los concentradores y que reflejaron, como consecuencia, una baja en el porcentaje de sólidos presentes en el licor negro concentrado. Dicha baja se refleja en la Figura 29. Es por esto que, como se mencionó en los primeros capítulos, gran parte del ensuciamiento de evaporadores de licor negro en las plantas de producción de celulosa, se deben a las precipitaciones de sales de sodio, específicamente, sales dobles de sodio como Burqueita y Dicarbonato.

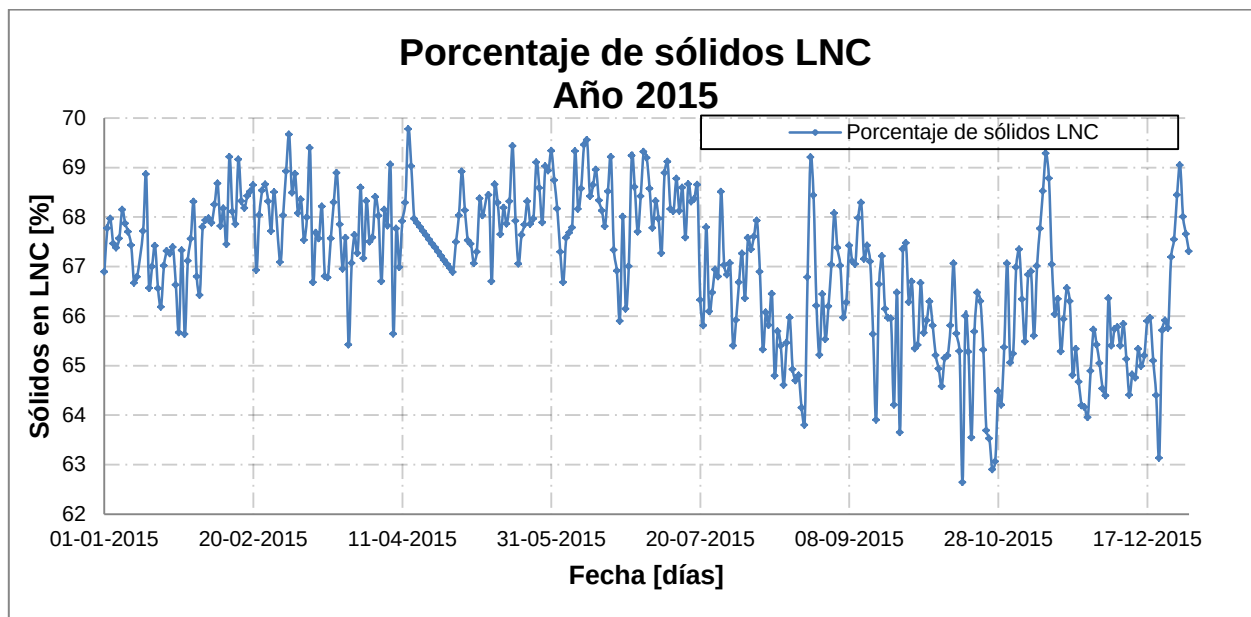


Figura 29. Comportamiento de los sólidos en LNC. Año 2015

Las sales de sodio simples como carbonato de sodio, sulfato de sodio y aquellas sales de sodio dobles como burqueita, dicarbonato o una mezcla de ambas, representan aproximadamente un 35% de las sales disueltas en el licor negro y, además, son causantes, prácticamente, de un tercio de los ensuciamientos de los evaporadores y/o concentradores, debido a la cristalización y posterior deposición de éstas. Planta Constitución realiza, periódicamente, análisis a los correspondientes licores negros encontrados en las diversas etapas del área evaporadores. Para la realización del correspondiente estudio, se examinaron los resultados de las muestras de licor negro concentrado obtenidos desde los concentradores. A continuación, en la Figura 30, se presenta el comportamiento, desde el año 2014 a la fecha, de la cristalización de las principales sales de sodio. Los valores obtenidos se realizan en base a la razón carbonato-sulfato de sodio, como se mencionó en capítulos anteriores.

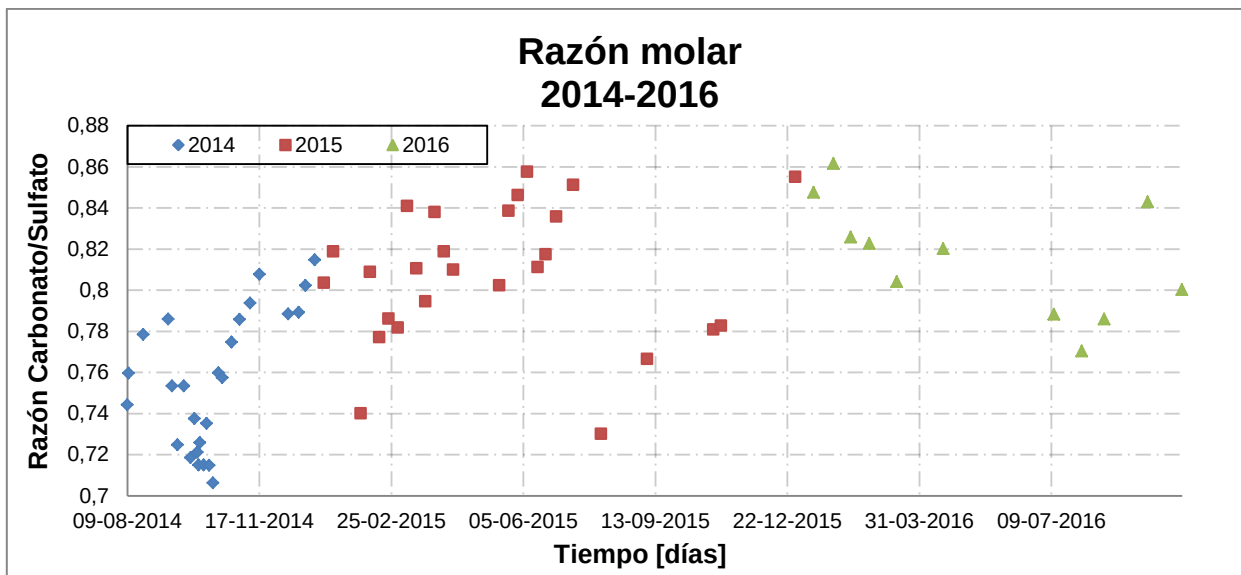


Figura 30. Análisis de LNC 2014-2016. Razón molar carbonato-sulfato.

Los datos obtenidos de los análisis registran valores que van desde 0.7 a 0.88, aproximadamente. Ahora bien, estos valores representados en la Tabla 9, constituyen la predicción de la cristalización y posterior precipitación de la sal de sodio presente en el licor negro.

Tabla 9. Predicción de cristalización sales de sodio presentes en licor negro. [10]

Región de cristalización	Razón Molar $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{Na}_2\text{SO}_4$
Burquetita	<0.68
Burquetita + Dicarbonato	0.68-0.83
Dicarbonato	0.83-0.89
Carbonato	>0.90

Además, Planta Constitución se basa ésta tabla para entregar el correspondiente informe de análisis de licor negro. Para mayor detalle revisar el correspondiente anexo.

Cristalización de sales de sodio y el lavado de concentradores.

Los concentradores de película descendente (*falling film*) en Planta Constitución están diseñados con un sistema que permite cambiar la secuencia de operación. El programa implementado en el DCS (Sistema de control distribuido) contiene ocho secuencias diferentes de operación para los concentradores. Cuatro de estas secuencias mantienen a todas las unidades en etapa de concentración y las cuatro restantes separan a una de las unidades para someterla a lavado, manteniendo las otras tres concentrando licor.

Las cuatro secuencias de concentración se alternan una a una con las cuatro secuencias de lavado, saliendo siempre de proceso aquella unidad que ha pasado operando con el licor de mayor concentración, obteniendo así el máximo rendimiento posible en todo momento. Ahora bien, cuando la planta evaporadores se encuentra estado normal de operación, el operador debe proceder a cambiar la secuencia operacional de los concentradores, según las condiciones del proceso, es decir, cada dos a ocho horas. Es necesario tener en cuenta que, los periodos de lavado pueden ser más frecuentes de lo normal y se debe, **básicamente, a los niveles de ensuciamiento de los concentradores.**

A continuación, en la Figura 31, se indican los tiempos de lavado de los cuatros concentradores durante el periodo 2015(periodo principal de análisis)

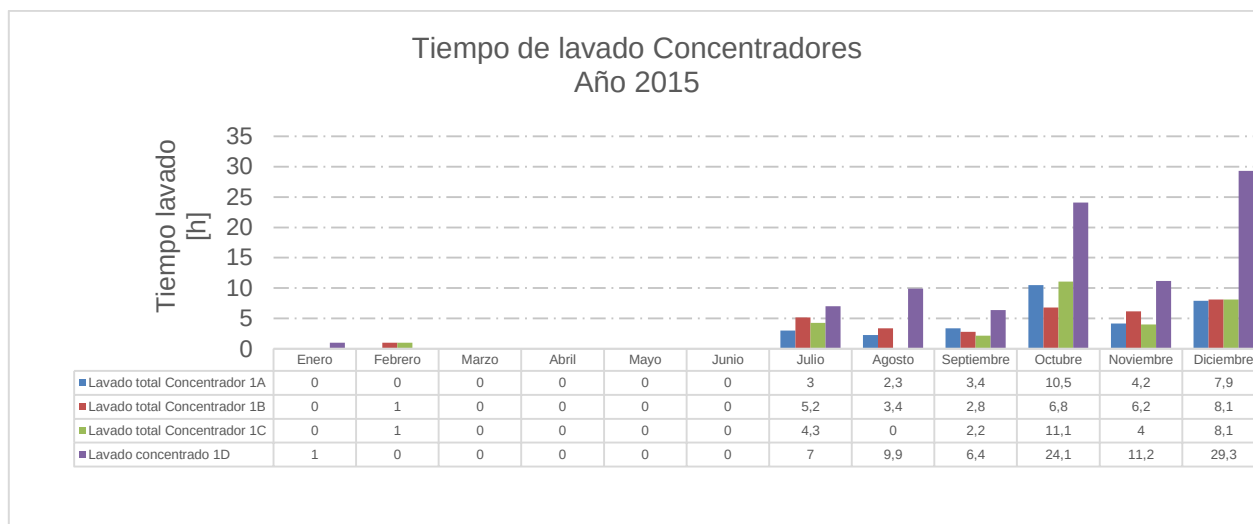


Figura 31. Tiempo lavado de concentradores. Año 2015

La correspondiente Figura 31 muestra, claramente, el aumento significativo del tiempo de lavados de todos los concentradores del área de evaporadores, específicamente, desde el periodo de inflexión, correspondiente a la segunda mitad del año. Básicamente, un aumento de lavado en los concentradores es consecuencia del aumento sostenido del ensuciamiento de los evaporadores y, por lo tanto, la operación normal para obtener el porcentaje de sólidos ,presentes en el licor negro concentrado, sea hace dificultosa. Lo anterior queda expresado en la Figura 29, anteriormente explicada.

Tras conocer el aumento significativo de lavados de los concentradores de planta evaporadores, se puede conocer la posible relación que existe entre la teoría de sales de sodio y los lavados frecuentes a evaporadores. Lo anterior se debe, fundamentalmente, a la solubilidad de las sales. Por un lado, las sales como el carbonato de sodio o sulfato de sodio, son bastante solubles en agua, ya que, son sales consideradas “simples” y están siempre circulando en el proceso. Las otras sales de sodio, consideradas sales “dobles”, son aquellas que a ciertas condiciones, como temperatura del licor, porcentaje de sólidos; cristalizan, precipitan y, muchas veces, se depositan en las superficies de transferencia de calor. Estas sales son la burqueita y dicarbonato, teniendo la primera sal mejor remoción y solubilidad que la segunda sal. En otras palabras los lavados, principalmente con agua industrial, le devuelven el medio a las sales (consideradas pocos

solubles) y hacen que circulen en el licor negro. No obstante, si el depósito es considerado como *scaling* se necesitará un lavado químico previa detención de la unidad.

Para realizar el correspondiente análisis, se indicará en el gráfico de los valores de razón molar carbonato/sulfato del LNC, la regiones de cristalización de los compuestos a cristalizar, según los valores indicados por Planta Constitución y, que, son los expuestos en la Tabla 9. En primer lugar se analizará, solamente, el año 2015, ya que, es el correspondiente periodo de interés a analizar en esta investigación. A continuación se presentan las regiones más predominantes o de interés para analizar la predicción de la cristalización de sales.

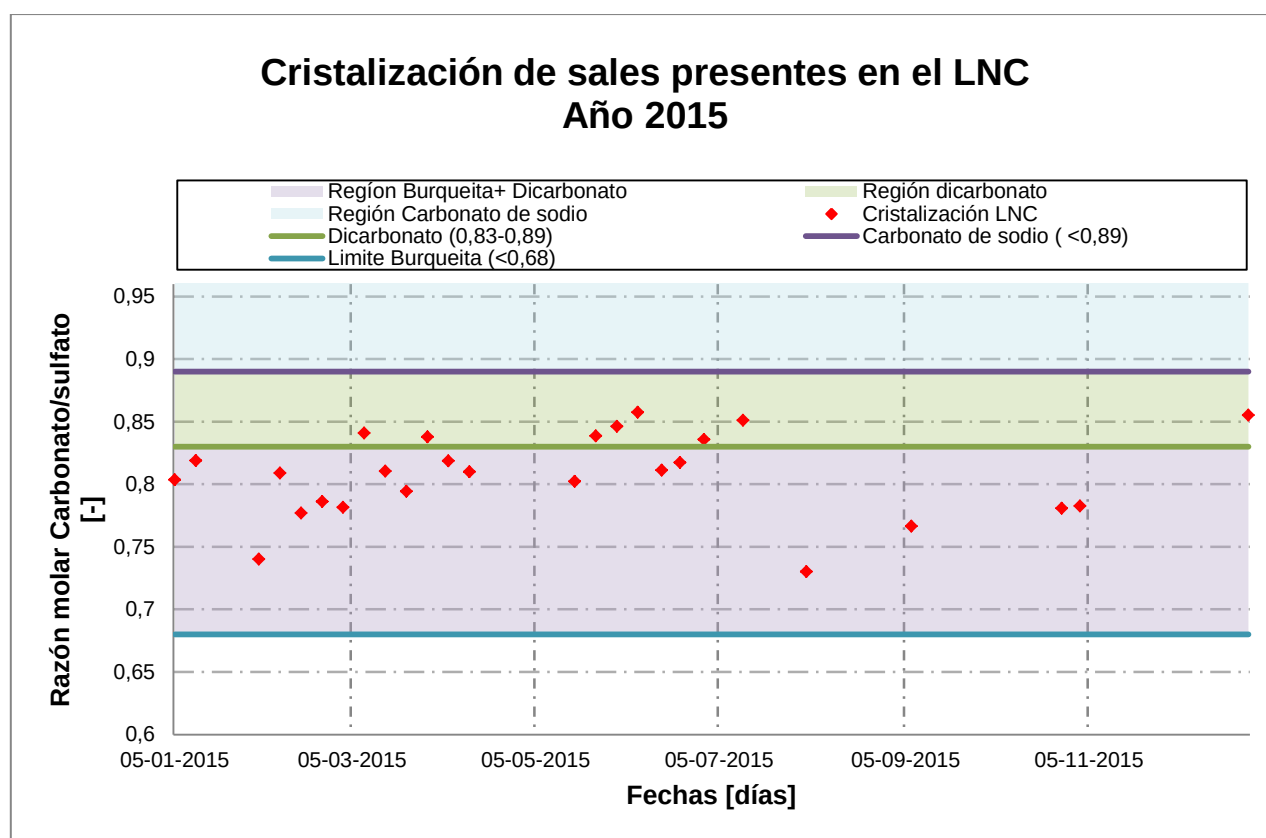


Figura 32. Cristalización de sales de sodio en el LNC

Ahora, al analizar detenidamente la Figura 32, se puede observar que, gran parte de las muestras de LNC posee regiones de cristalizaciones de “Dicarbonato+ Burqueita” y, sobre todo, muestras de LNC en la región de Dicarbonato. Como se mencionó anteriormente, el dicarbonato es una sal doble de baja solubilidad, provocando mayor frecuencia de lavados a los concentradores, debido a su alta capacidad de precipitación. Ahora bien, al comparar la Figura 32 con la correspondiente Figura 33, la cual representa la frecuencia de lavados de los concentradores durante el año 2015,

se llega a una posible contradicción, ya que, el periodo de menor frecuencia de lavados, existen sales insolubles de mayor tasa de precipitación, especialmente, Dicarbonato.

La obtención de la sal de sodio que precipitará en Planta Constitución se rige por la fórmula de Adams [17], en otras palabras, entrega la información de la posible región donde precipitará la sal de sodio. Ahora bien, los límites de las regiones donde precipitarán dichas sales, expresados en la Tabla 9, son obtenidos del paper “*Nucleation, Growth, and Composition of Crystals Obtained from Solutions of Na_2CO_3 and Na_2SO_4* ”[14], el cual indica que dichos límites funcionan en condiciones de proceso de una planta piloto, la cual dista mucho de las condiciones de proceso de una planta industrial, como Planta Constitución. Por lo tanto, es necesario ajustar los límites de las regiones de precipitación de sales de sodio acorde a las condiciones de proceso, es decir, que exista coherencia entre el tipo de sal que precipita y la frecuencia de lavado de los concentradores de licor negro.

A continuación se exponen los gráficos, tanto de frecuencia de lavados como también el gráfico reacomodado de las regiones de precipitaciones de sales de sodio. Ambos representados en la Figura 33 y 34, respectivamente.

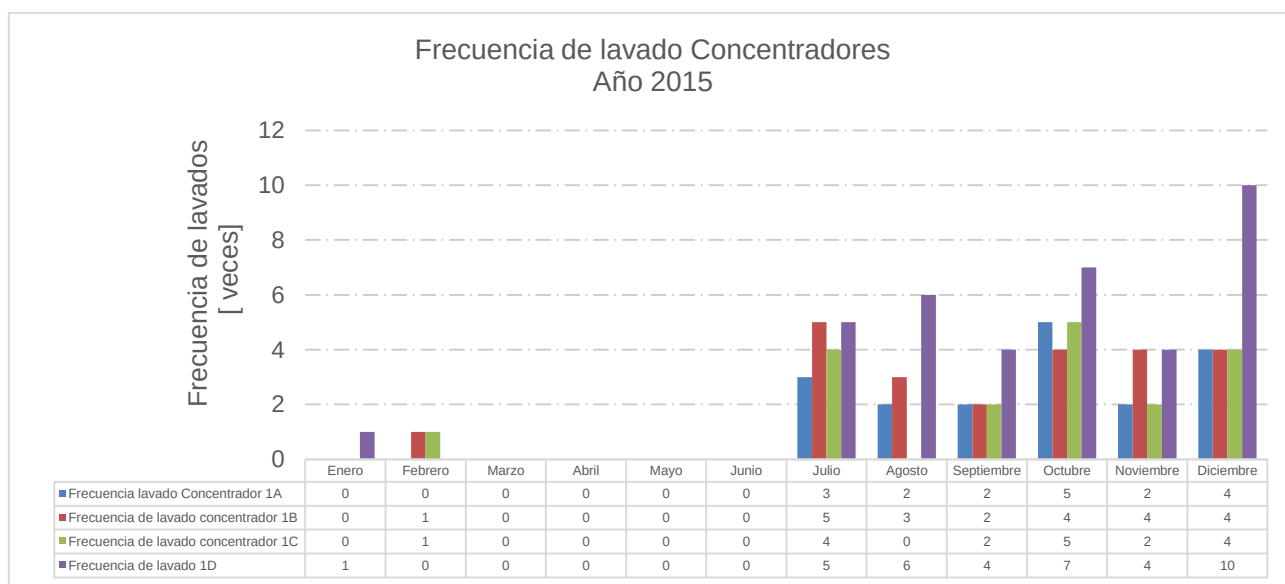


Figura 33.Frecuencia de lavados Concentradores.

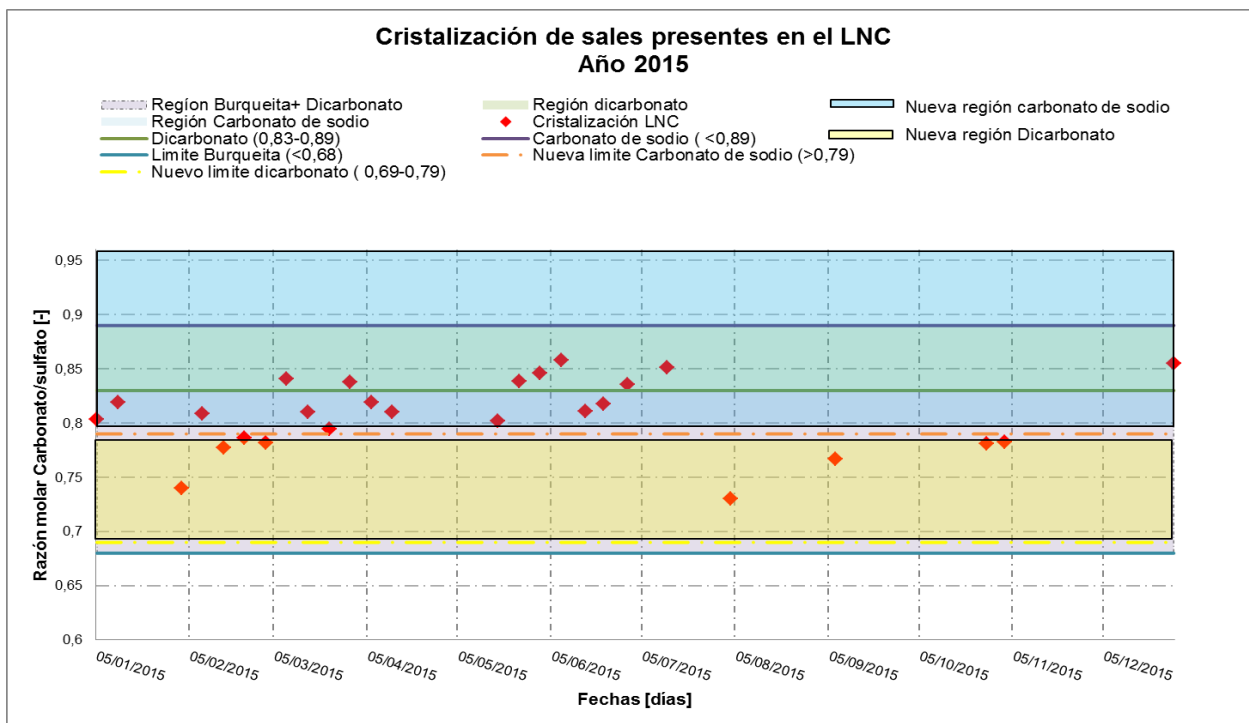


Figura 34.Reacomodación de regiones de cristalización de sales de sodio presentes en el LNC

Las nueva configuración de las posibles regiones de cristalización se resumieron a dos, es decir: Región de dicarbonato (0,69-0,79) y región de carbonato de sodio (>0,79), según los datos y condiciones del licor negro concentrado. Esto debido, principalmente, a la condición de frecuencia de lavados en Planta Constitución. Los primeros puntos, a excepción de algunos pertenecientes a enero y febrero, que llegan hasta el punto de inflexión(principios del mes de agosto), siguen un misma tendencia, es decir, cumplen la condición de solubilidad relativamente alta, la que se refleja a una nula frecuencia de lavado en concentradores. Por lo tanto, la sal presente en el análisis del LNC tendría, posiblemente, características bastantes similares a una simple, como lo es el carbonato de sodio. Por otro lado, la tendencia que presenta mayores cantidades de lavados tendría, posiblemente, características de una sal doble de baja solubilidad, como lo es el dicarbonato.

Si bien es cierto, la nueva configuración fue diseñada solamente de carácter empírico, presentaría condiciones más cercanas a las realidad de la Planta Constitución que la anterior configuración obtenida de un paper cuyos valores fueron obtenidos de una planta piloto. Es necesario indicar que las regiones de cristalización se mantienen invariables, lo que si puede cambiar son los

límites de cada región y fue, precisamente, lo que se realizó en el presente trabajo. Ahora bien, podría existir otra región que satisfaga la condición de solubilidad alta y, además, poca frecuencia de lavado; sería la región perteneciente a la burqueita. Si bien esta sal doble posee características de solubilidad mayor a la sal Dicarbonato, pero menor a la sal simple carbonato de sodio, podría ser una alternativa factible al escenario presente en Planta Constitución. La Figura, resume tanto la opción tomada en el trabajo, como también una posible opción a ser considerada en trabajos posteriores, debido a que, según los antecedentes previos estudiados, 29 plantas diferentes de pulpa de celulosa kraft en Estados Unidos indican que, en el 40 % de ellas, la burqueita o una mixtura de burqueita y dicarbonato cristalizan primera cuando el licor es concentrado [16].

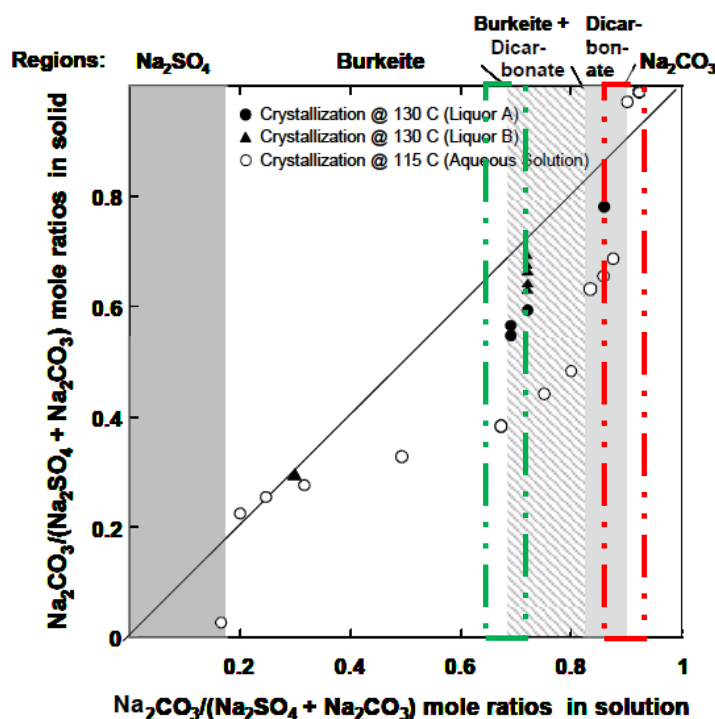


Figura 35. Posibles regiones de precipitación de sales de sodio presentes en el LNC, Planta Constitución. Opción tomada (rojo), opción a considerar (verde).

Por último, sería ideal poder obtener mediante técnicas de laboratorios más adecuadas, por ejemplo análisis tipo SEM o XRD, la obtención de los correspondientes compuestos más cercanos a precipitar presentes en una muestra de licor negro concentrado, con la finalidad de obtener los límites de las regiones exactos.

7.1.4 Probable origen de ensuciamiento en evaporadores: Tiempo prolongado de la madera almacenada.

En el capítulo anterior, relacionado a la precipitación de sales de sodio, se puede obtener el posible agente causante que provoca la dificultad de transferencia de calor en los evaporadores para poder concentrar el licor y obtener el producto deseado: Licor negro concentrado con un porcentaje de sólido mayor o igual a 65% (p/p). Ahora bien, ¿por qué las fluctuaciones de las precipitación de éstas sales? En primera instancia, se pensaba que el origen podría deberse a un mal proceso de caustificación, específicamente a una causticidad baja. Como se mencionó en capítulos anteriores, el causticidad sólo posee bajas puntuales y no necesariamente representa el fenómeno estacional de ensuciamiento que ocurre en evaporadores, por lo que no sería una fuente de carbonato de sodio que desplazaría la razón carbonato/sulfato a alguna región indicada en la Figura 35. Por otro lado, la principal fuente de sulfato de sodio es la eficiencia de recuperación de la caldera recuperadora y, según informes recopilados, la eficiencia de dicha caldera estaría sobre el 95%, aceptable para mantener el sulfato de sodio en condiciones estables. Es por esto que se llegó a la posible hipótesis de analizar el efecto que produciría en evaporadores mantener una madera almacenada por un periodo prolongado de tiempo y, como su almacenaje estando cercano al mar, ser una posible fuente de sales que ocasionaría el ensuciamiento estacional prolongado en evaporadores y/o concentradores.

El efecto del almacenamiento prologando de la madera, específicamente, el rollizo de pino de radiata, ha sido estudiado en plantas de celulosa con el propósito de conocer sus efectos en las propiedades físico-químicas en el pulpaje kraft, como por ejemplo: Rendimiento clasificado, cantidad de rechazos, índice kappa, etc. Sin embargo, su efecto en el proceso kraft, específicamente, en la etapa de recuperación de reactivos, su estudio ha sido somero.

A continuación se introducen algunos efectos del almacenamiento prolongado de la madera en el proceso kraft, para luego ser centrado el análisis del efecto del envejecimiento del inventario sobre el ensuciamiento de los concentradores pertenecientes al área evaporadores.

7.1.4.1 Efecto del almacenamiento en respuestas del proceso kraft.

Los principales causantes de la degradación de la madera, tras ser almacenada por periodos prolongados, son los hongos, los que causan, entre otras causas, reducción de la densidad de la madera, lo que trae como consecuencia, menores rendimientos clasificados en el proceso de elaboración de pulpa kraft. Ahora bien, el tiempo prolongado de almacenamiento deteriora las características de la pulpa y el almacenamiento de la madera a causa de la variabilidad en las propiedades de la pulpa [23].

Con respecto a antecedentes de efectos causados al proceso de recuperación de reactivos, específicamente al área evaporadores, son bastantes escasos en la bibliografía correspondiente. Ahora bien, como se dijo anteriormente, el área de evaporación, perteneciente a la planta térmica, indicó la posibilidad de encontrar cierta relación en el efecto del almacenamiento prologando de la madera y su repercusión en evaporadores, esencialmente, en el fenómeno de ensuciamiento prematuro de concentradores, causa principal de la baja en el porcentaje de sólidos presentes en el licor negro concentrado (LNC).

7.1.4.2 Análisis del efecto del tiempo prolongado de almacenamiento de rollizo de pino radiata en evaporadores.

Para realizar el correspondiente análisis del tiempo prolongado de almacenamiento del rollizo de pino, es necesario indicar que la madera que va finalmente a proceso de cocci3n, se encuentra en forma de astilla, y 3sta es una mezcla de astilla externa y astilla interna; la primera permanece un tiempo relativamente bajo, previo a ser incorporado al proceso y, la segunda, se compone de: Madera apta o lista para ser “picada” y enviada a proceso, denominada madera “picado directo” y madera no apta para ser ingresada de inmediato a proceso, ya que no cumplir con cierto est3ndares es almacenada y ser3 denominada “Madera en Canchas”, t3rmino que se refiera a la madera que ser3 almacena en centros de acopio denominados” canchas” y cada “cancha” posee varias columnas. 3ste 3ltimo tipo de madera es la que nos basaremos para realizar el correspondiente an3lisis.

7.1.4.3 Metodología de obtención del tiempo de almacenamiento madera.

El tiempo de almacenamiento de madera de pino radiata se define como: el tiempo que transcurre desde que el árbol fue cortado (fecha de corte) hasta que ingresa a planta. Sin embargo, Como la mayoría de las plantas de celulosa poseen grandes volúmenes de producción, necesitaran poseer centro de acopio ante cualquier imprevisto externo, con la finalidad de no detener la producción por falta de materia prima. Por lo tanto, al tiempo de almacenamiento habría que agregarle el factor de almacenamiento interno en las correspondientes “canchas”. La correspondiente expresión del tiempo de almacenamiento total quedaría de la siguiente forma:

$$\text{Tiempo almacenamiento total} = (\text{fecha ingreso planta} - \text{fecha corta} + \text{tiempo almacenado en canchas})[\text{semanas}]$$

Ahora bien, es necesario desglosar el “tiempo almacenado en canchas”, el cual se define de la siguiente manera:

$$\text{Tiempo almacenado en canchas} = (\text{fecha consumo} - \text{fecha ingreso planta}) [\text{semanas}].$$

Por lo tanto, la expresión quedaría resumida a la siguiente expresión:

$$\text{Tiempo almacenamiento total} = (\text{fecha consumo} - \text{fecha corta}) [\text{semanas}]$$

Para la obtención del tiempo que ha permanecido la madera almacenada, es necesario, primero, ordenar la información de la empresa relacionada a las fecha de ingreso y posterior asignación del lugar de almacenamiento, fechas de consumo. Este orden permitirá realizar de mejor forma el “el seguimiento” o trazabilidad de la madera.

Como la cantidad de madera, es decir, metros ruma (MR) o metros sólidos secos (MSS), se almacenan en canchas y, cada cancha tiene numerosa columnas, el seguimiento se realizará, entonces, en base a una cancha y columna en específico, que tendrá como expresión “C_{ij}”; donde “i” representan la cancha y “j” la columna. Dicha expresión ayudará a entender de mejor forma la metodología propuesta.

Teniendo en cuenta de que cada MSS que entra a ser almacenado a una cancha y columna C_{ij} , será consumido en una semana cualquiera, se asentará especial énfasis en hacer coincidir los MSS que ingresan y en qué momento se consumen dichos MSS, a fin de obtener por medio de la fecha (semana) de consumo el tiempo que la madera ha permanecido sin ser procesada, es decir, el cantidad de tiempo que la madera ha sido almacenada.

Ahora bien, para la obtención se las semanas que la madera ha sido almacenada sin ser procesada, se encontraron ciertas dificultades las cuales serán resumidas en “casos”, los que se presentan a continuación:

- Caso 1

Este caso representa los MSS que ingresan una semana “x” y es destinada a almacenaje a un cancha y columna “ C_{ij} ”, se consumen, en su **totalidad**, una semana “y”. Dicho caso, se dio en menor magnitud tras realizar el análisis correspondiente, ya que, el consumo de los MSS suele ser en distintas semanas.

- Caso 2

Representa los MSS que ingresan una semana “x” y es destinada a almacenaje a una cancha y columna “ C_{ij} ”, se consumen en su totalidad, pero, en distintas semanas.

Dicho caso presenta mayor frecuencia dentro del análisis realizado. Es necesario indicar que ambos casos presentan la particularidad de que la correspondiente cancha y columna “ C_{ij} ” “presenta solo una semana de ingreso. A continuación se presentan los casos que indican distintas semanas de ingreso a almacenaje a la cancha “ C_{ij} ”.

- Caso 3

Representa la cancha y columna “ C_{ij} ” a la cual ingresan MSS en distintas semanas y se consumen, en su totalidad, una única semana.

Como en este caso a la correspondiente cancha y columna “C_{ij}” ingresan MSS en distintas semanas, pero con el consumo de los MSS en una única semana, se realizó, por lo tanto, el orden de información relacionada al consumo, para así facilitar la trazabilidad correspondiente.

- Caso 4

Representa la cancha y columna “C_{ij}” a la cual ingresan MSS en distintas semanas y se consumen, en su totalidad, en distintas semanas.

Este último caso posee la mayor dificultad para hacer coincidir los MSS ingresados sean iguales a los MSS consumidos. Por lo tanto, se ocupará la metodología FIFO, para realizar la trazabilidad de los MSS ingresados y consumidos. Por lo tanto, tras realizar la trazabilidad o hacer coincidir los MSS ingresados la primera semana con sus correspondientes fecha de consumo (en semanas), se continuará con la segunda semana y así sucesivamente, hasta finalizar tantas semanas de ingreso de MSS posea la cancha “C_{ij}”.

El caso 4 es el que tuvo mayor frecuencia dentro de la metodología correspondiente.

Tras finalizar la trazabilidad de la madera y encontrar, para cada cancha y columna “C_{ij}”, el tiempo de almacenamiento (en semanas) de la madera, se realizará el promedio de semanas por cada y columna “C_{ij}” que estuvo almacenada la madera.

Por otro lado, la variable “ensuciamiento”, específicamente la relacionada al concentrador 1D, se tomaron los valores durante todo el año 2015, agrupados por semana. Tras ser agrupado por semanas, se recurrió, al igual que el almacenamiento de la madera, a ser promediados los valores por semana. Finalmente, el resultado expresado en la Figura 35, se muestra a continuación

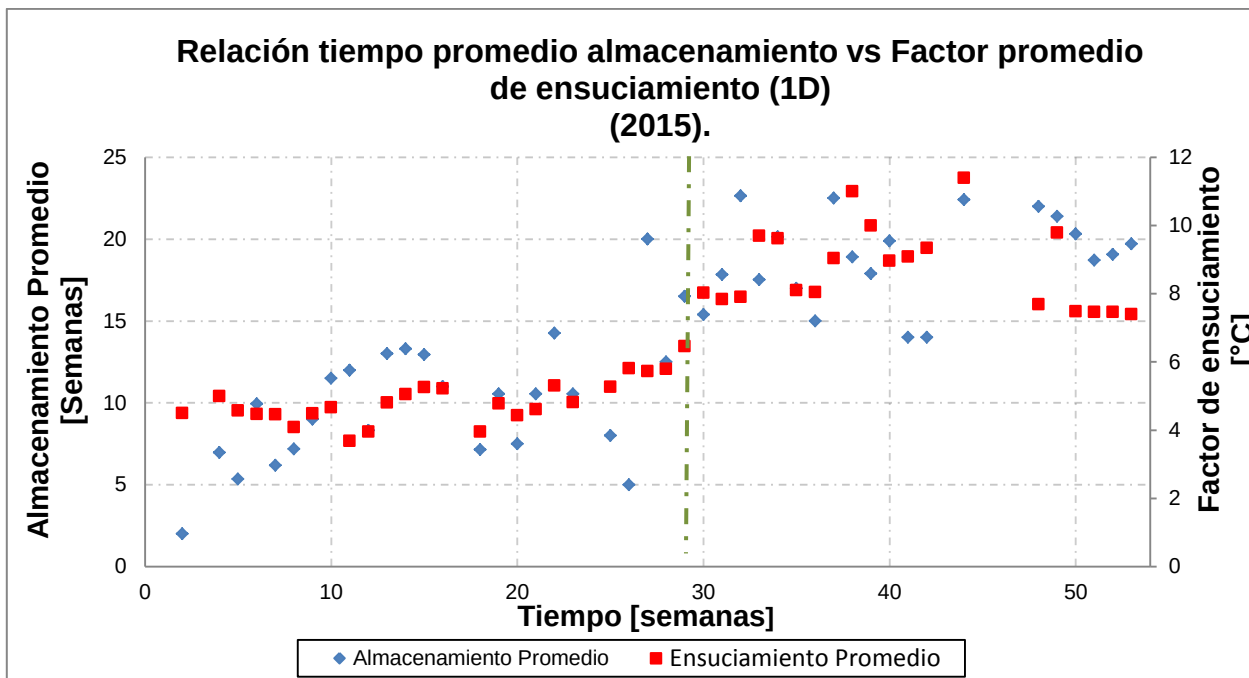


Figura 36. Relación ensuciamiento promedio vs tiempo almacenamiento promedio. (2015)

La Figura 36, expresa la relación que existe entre el ensuciamiento del concentrador 1D con el tiempo que permaneció almacenada la madera en las correspondientes canchas y columnas de Planta Constitución. Como se mencionó anteriormente, dicho tiempo abarca desde la fecha de corta hasta el periodo o semana que se consumen los MSS de rollizo de pino.

Debido a la gran extensión de canchas y columnas de Planta Constitución, es que el presente análisis abarca el 70 % del total de canchas y columnas de la Planta. Sin embargo, dicho porcentaje representa una tendencia clara y notoria en relación al origen del problema asociado al ensuciamiento prematuro de concentradores; además, el punto de inflexión (indicado con la línea segmentada de color verde) comienzan aproximadamente la misma fecha en ambos casos, lo que indica la evidente relación entre ambas variables.

Finalmente, por simple inspección, se aprecia en la Figura 36, que el comportamiento del ensuciamiento de los concentradores, específicamente el 1D, permanece estable para un almacenamiento promedio menor o igual a 15 [semanas] (3 meses) y, por lo tanto, un valor superior a este traería como consecuencia mayores problemas asociados a ensuciamiento prematuros en el área de evaporadores.

Ahora bien, fue necesario poder extender el análisis hacia el año 2016, debido, principalmente, a que la tendencia durante el año 2015 es bastante clara y se quiere comprobar si existe cierta tendencia durante el año 2016. La metodología de obtención del tiempo total que la madera permaneció almacenada sin ser procesada y su impacto en el ensuciamiento de los concentradores, específicamente, el concentrador 1D, fue similar a la que se ocupó para el año 2015. El resultado se presenta a continuación, en la Figura 37.

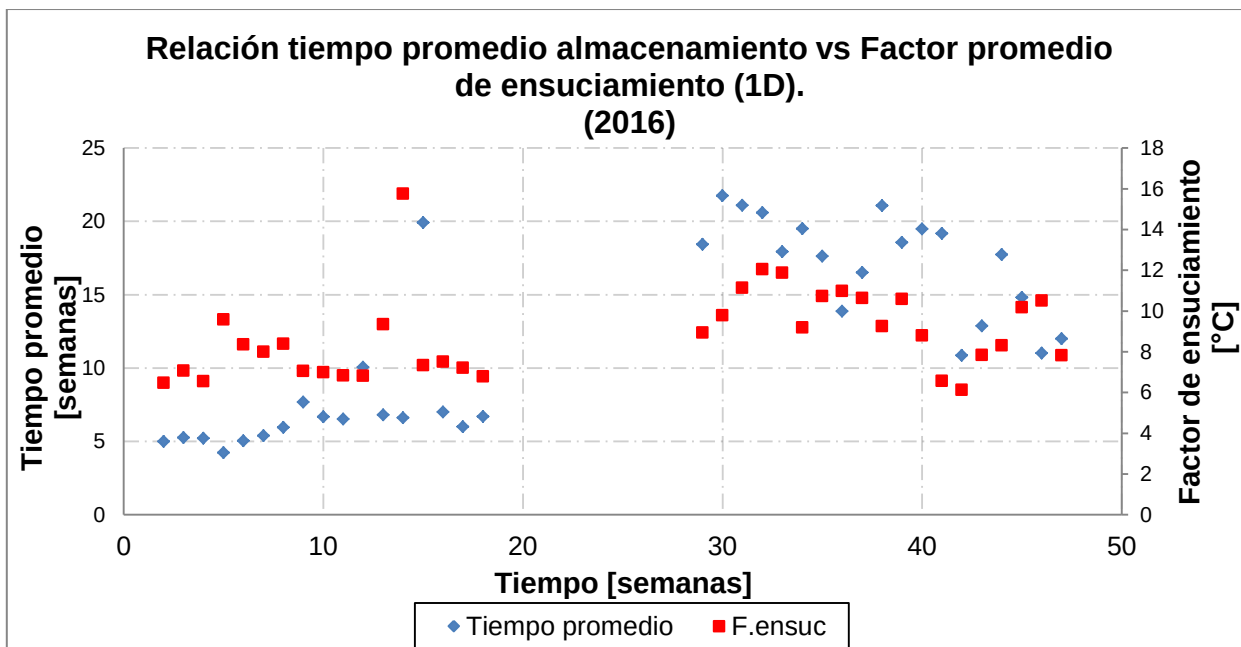


Figura 37. Relación ensuciamiento promedio vs tiempo almacenamiento promedio. (2016).

Al observar la Figura 37, se produce una tendencia similar, pero con menor claridad que la expuesta en la Figura anterior. La primera parte, antes de la parada general de planta realizada entre la semana 20 y 30, se ve una estabilidad en el fenómeno de ensuciamiento, expresado en el valor del factor de ensuciamiento. Esta estabilidad, se debe, en gran parte, a que el tiempo de almacenamiento de la madera es relativamente bajo, en comparación a las semanas venideras. Posterior a la parada general de planta, tanto evaporadores y/o concentradores están limpios. Sin embargo, como se expresa en la correspondiente Figura 37, a medida que transcurren las semanas, el incremento del ensuciamiento es notorio y va de la mano con el aumento gradual de envejecimiento de inventario o tiempo de almacenamiento de la madera. Ahora bien, en las últimas semanas, como muestra en la Figura 37, ocurre un fenómeno que indica, aún más, la

relación entre estas dos variables. Por un lado, ocurre (antes de la última semana que se indica en la Figura 37) una tendencia al alza, debido a que se estaba agotando el suministro de materia prima (a partir de la semana 40) y se estaba consumiendo madera de distintas datas de almacenamiento, con la finalidad de que el proceso de producción de celulosa continúe lo más posible, ante la inminente falta de suministro. Una vez que regularizó el tema externo, se comenzó a utilizar madera “fresca” (semana 46), es decir, con data de almacenamiento interno prácticamente nulo y, por lo tanto, al observar la parte final de la Figura 37, se observa la relación directa que existe entre un menor tiempo de almacenamiento (prácticamente sólo influye la data de corte del árbol) y el correspondiente menor grado de ensuciamiento en evaporadores y/o concentradores

7.1.5 Posible (s) relación(es) entre el tiempo prologando de la madera de pino almacenada y la precipitación de sales de sodio.

Debido a que existe la posibilidad que el origen del ensuciamiento de los concentradores se deba a un almacenamiento prologando de la madera de pino radiata, donde sus propiedades cambian y afectan al proceso de producción de celulosa y, sobre todo, al proceso de recuperación de reactivos. La posibilidad de que el origen se deba al envejecimiento de inventario es bastante probable, debido, principalmente, al comportamiento de los concentradores frente al escenario cuando se procesa madera con un promedio de data de almacenamiento mayor o igual a 15 semanas. Por otro lado, los posibles agentes causantes del ensuciamiento (en mayor medida) se deban a las precipitaciones de sales de sodio, como se explicó en capítulos anteriores.

Sin embargo, falta un hilo conductor entre estas variables que haga más robusto dar a conocer, que ambas variables, sean las responsables de la problemática en evaporadores. Como Planta Constitución se encuentra cercana al mar y, más aún, sus canchas de almacenamiento es que surgió la hipótesis de que una fuente de sodio al sistema sea la incorporación de sal de mar a la madera. La madera al estar expuesta al calor y secado (como luz solar directa) va evaporando el agua que contiene el tronco y van formando cristales de sales en la celulosa de la madera, que con el paso del tiempo, las fuerzas físicas ejercidas los cristales empujan las fibras de la madera, causando un aspecto borroso [24]. Este aspecto se confunde muchas veces con el aspecto que dejan los hongos, que también son causantes (principales) de deterioro en la madera, pero son considerablemente diferentes [24].

Existen registros que madera cercana al mar, los principales cristales presentes en la madera serían los de cloruro de sodio, tras la realización de un análisis microscópico de barrido electrónico [25]. Ahora bien, la incorporación de sodio al sistema debido a los cristales de cloruro de sodio o “sal de mar” podría ser un nexo entre el origen del ensuciamiento (madera con tiempo de almacenamiento prolongado) y el agente causante del ensuciamiento (precipitación de sales de sodio).

Sin embargo, es necesario precisar que, por motivos de tiempo, no se estudió con profundidad esta posible relación entre las variables anteriormente mencionadas. Pero sería de utilidad, en estudios posteriores, poder reafirmar o contrastar la hipótesis mencionada, con la finalidad de que se pueda solucionar, acabadamente, la problemática de ensuciamiento en evaporadores y/o concentradores.

8. Análisis Económico

Es necesario precisar que el análisis económico será realizado en base a mejoras a corto plazo del área de evaporadores, por lo que realizar un cambio relacionado a reestructurar el almacenamiento interno de los rollizos de pino en Planta Constitución sería un proceso largo y tedioso, es que, se ha impulsado el realizar un análisis económico relacionado directamente a mejoras de evaporadores, que suplirá de mejor forma los fenómenos relacionados al ensuciamiento de evaporadores correspondidos al desgaste o envejecimiento de inventario (rollizos de pino).

La primera parte, relacionada netamente con los beneficios, se divide en tres (3) grandes ejes: Generación de energía eléctrica, ahorro de consumo de petróleo, menor producción por alto nivel de licor negro débil por baja eficiencia de evaporadores.

- Generación de energía eléctrica: Este punto se centra en la obtención de generación de energía eléctrica en base a la obtención de un porcentaje de sólidos altos durante el periodo que sufrió una baja constante y que ha sido el periodo principal del análisis (Agosto-diciembre (2015)). El beneficio por el periodo de 5 meses alcanza un valor de 560.000 [USD/año].
- Ahorro consumo de petróleo por baja eficiencia de evaporadores: Principalmente este tópico radica en el ahorro de combustible convencional durante periodos donde el porcentaje de sólidos que va a quemarse a la caldera recuperadora se encuentra cercano o menor a 65%. La Figura 36, indica la tendencia de consumo durante el año 2015 de petróleo diesel.

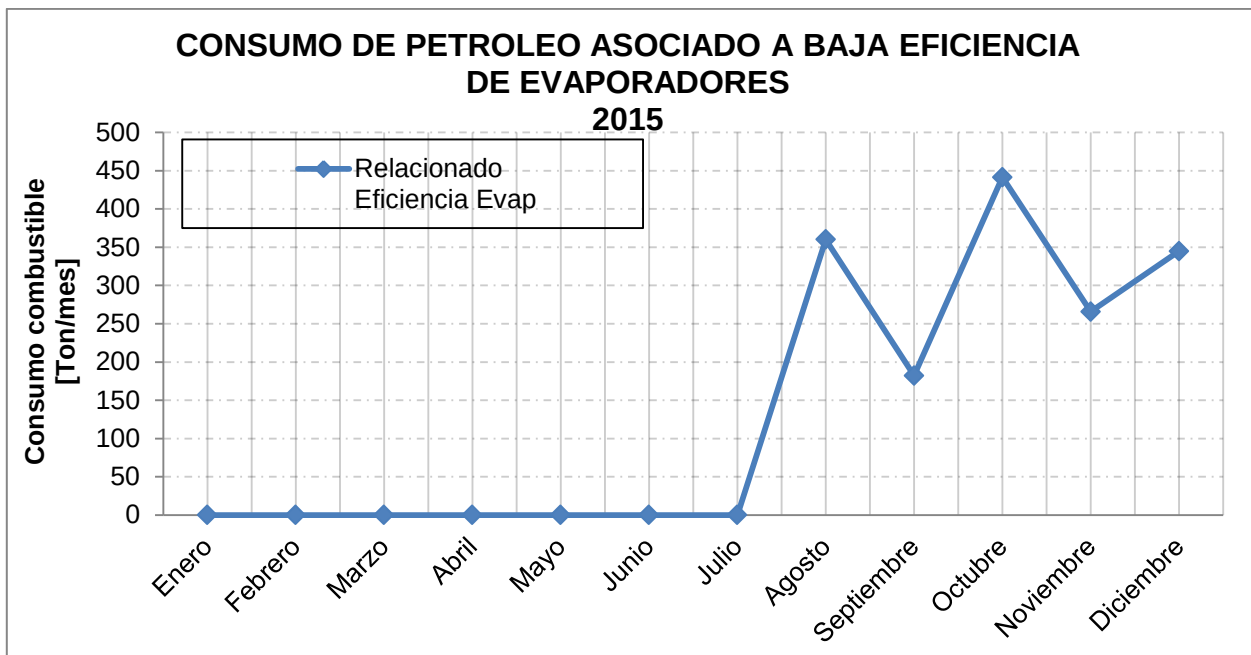


Figura 38. Consumo de petróleo caldera recuperadora. Año 2015

El Consumo de combustible auxiliar para la caldera recuperadora comienza a aumentar durante el periodo de inflexión, debido, principalmente, a la baja de sólidos presentes en el licor negro concentrado que va a quemado. Finalmente el beneficio de ahorrar combustible durante el periodo de baja de sólidos se traduce en 720.000[USD/año].

- Menor producción por alto nivel de licor negro débil, baja eficiencia de evaporadores: Debido a que la capacidad de evaporación de la planta de evaporadores está cercano a su diseño, el aumento de licor negro débil que proviene desde el área previa, es decir, Digestores, específicamente, lavado de pulpa, producto de obtención de pulpas como “L especial” promueve mayores cantidad de licor negro débil lo que imposibilita evaporar por falta de capacidad del área. El beneficio de mejorar esta pérdida de producción tendría un valor de 268.000[USD/año].

Para mayores detalles sobre la obtención de dichos valores revisar el anexo correspondiente.

A continuación se presenta el correspondiente resumen de ingresos-egresos y los principales indicadores relacionados a la evaluación económica.

Tabla 10. Evaluación económica proyecto: implementar mejoras en evaporadores.

Resumen ingresos –egresos

Aumento Generación Energía eléctrica	kUSD / año	560
Ahorro de petróleo	kUSD / año	720
Pérdidas de producción	kUSD / año	268
Total	kUSD / año	1548

Tabla 11. Evaluación económica

Evaluación económica

Inversión	kUSD	10.000
TIR	%	9,3
VAN	kUSD	193
Td	%	9

9. Conclusiones y recomendaciones

- 1) Se obtuvo a partir de lo estudiado, que los efectos referidos de la bibliografía asociada a fenómenos de ensuciamiento de evaporadores y/o concentradores como: eficiencia de separación jabón-licor, causticidad, cantidad de fibra en el licor, mantendrían valores en Planta Constitución similares a los referidos a la bibliografía estudiada. Si bien es cierto, la Causticidad es un operación que tiene influencia en la cantidad de carbonato de sodio circulante en el sistema y, por lo tanto, puede ocasionar posibles ensuciamiento en evaporadores, se concluyó que posee impacto, en menor medida, cuando la causticidad baja del 80%, pero, su efecto sería carácter más bien puntual y no prologado en el tiempo; durante el periodo 2015. Las restantes causas analizadas como : Separación jabón-licor, cantidad de fibra en el licor, análisis granulométrico; no tendrían efecto sobre el ensuciamiento de evaporadores y/o concentradores. A modo de recomendación, según información entregada en planta, sería óptimo analizar fuentes de sílice en planta, debido a que se han encontrado incrustaciones con contenido de sílice. Por otro lado, no se analizó el contenido de calcio o carbonato de calcio, debido a que la operación del desactivado de calcio en planta evaporadores no tuvo la disponibilidad operacional deseada, donde ciertos días el desactivador de calcio no operó y el fenómeno de ensuciamiento de concentradores no se produjo, por lo tanto, la posibilidad de que el carbonato de calcio sea causante de ensuciamiento es baja.
- 2) Un aspecto fundamental que se obtuvo del estudio realizado fue la similitud entre la cantidad o frecuencia de lavados con la solubilidad de las principales sales que provocan el ensuciamiento: sales de sodio. La tendencia de los valores obtenidos del análisis del LNC de Planta Constitución realizados en Planta Nueva Aldea, indicaron claramente que, para los periodos de baja o nula frecuencia la relación carbonato/sulfato indicaban que la sal a precipitar estaría en la región perteneciente al carbonato de sodio (<0.79), sal de mayor solubilidad en comparación al dicarbonato de sodio (sal de sodio doble), que es la región donde las sales precipitarían cuando la frecuencia de lavado aumenta. Por lo tanto,

existe la posibilidad de que el agente causante del fenómeno de ensuciamiento sea el Dicarbonato de sodio. Por otro lado, sería ideal (en un trabajo a futuro) poder analizar la viabilidad de la “opción a considerar” expresada en la Figura 35. Además esta opción, junto a la elección tomada, se pueda realizar un análisis de difracción de rayos x (DRX o XRD) o SEM, para la identificación de fase/composición que distingue los compuestos mayores, menores, y de traza presentes en la muestra, además de conocer los límites de las regiones de cristalización con mayor precisión.

- 3) Con respecto al tópico relacionado al efecto que produce en evaporadores el almacenamiento prologando de la madera o rollizos de pino en Planta Constitución, se obtuvo que el comportamiento de Concentradores, específicamente el concentrador 1D, se comporta de forma estable, es decir, con bajos niveles de ensuciamiento, para rollizos de pino que tengan una data de almacenamiento promedio menor o igual a 15 semanas (3 meses aproximadamente). Por otro lado, superior a esta data, como ocurrió durante el periodo agosto-diciembre del año 2015, los problemas de ensuciamiento en concentradores aumentaron. Además, para corroborar la relación entre estas dos variables, se realizó, bajo la misma metodología ocupada durante el año 2015, el análisis de mantener madera almacenada periodos prolongados de tiempo y su efecto en evaporadores para el año 2016, específicamente desde enero hasta noviembre.

Para el periodo anteriormente mencionado, la tendencia fue menos notoria que la registrada durante el año 2015, pero no significa que está alejada la relación entre ambas variables. Por un lado, la primera parte, es decir, antes de la parada general de planta, el comportamiento del ensuciamiento en el concentrador 1D se mantuvo relativamente estable y, por otro lado, el tiempo de almacenaje de la madera en cancha se mantuvo entre 5 a 10 semanas, periodo óptimo de almacenaje para no tener mucho deterioro y menor impacto en evaporadores. Sin embargo post-parada de planta, se ve claramente que el ensuciamiento comienza a aumentar cuando se utiliza madera con data de almacenamiento cercana a 20 semanas; además como se mencionó anteriormente, cuando se incorpora madera “fresca”, el fenómeno de ensuciamiento se regulariza notablemente.

- 4) Con respecto al nexo entre la influencia que provoca en evaporadores procesar madera con data de almacenamiento prolongado y los principales posibles agentes causantes de ensuciamiento, como lo son las precipitación de sales de sodio; existe la teoría, como se propuso en el trabajo, de que la cercanía de las canchas de almacenamiento al mar, puede ser un factor que provoque la incorporación de cristales de cloruro de sodio a la madera y, en consecuencia, al sistema o proceso de producción de celulosa. Ahora bien, como se expresó en su momento es necesario corroborar ésta hipótesis en temas futuros.
- 5) Finalmente, ante la dificultad de poder contar con la una rotación de inventario más rápido y que el proceso sea en función no sólo de la densidad de la madera, sino también del tiempo de almacenamiento, fue que se realizó un análisis económico relacionado mejoras asociadas a la planta evaporadores, como la finalidad de aumentar su capacidad y que los fenómenos producidos en evaporadores por procesar madera de distinta data de almacenamiento sean mínimos.

10. Anexo

10.2 Resumen Beneficio mejora evaporadores.

BENEFICIO TOTAL							USD/AÑO
							1.551.183

Generación de energía eléctrica		Porcentaje Sólidos Salida LNC Evaporadores	Flujo Vapor Salida Caldera Recuperadora	Toneladas Sólido Seco Quemado	Energía Promedio Vendida SIC		USD/AÑO
		%	t/h	Tss/Día	MWh	USD/Mes	
	Bajo Sólido	65,3	172	1.313	3,5	223.767	
	Alto Sólido	68,9	179	1.395	5,2	336.145	
	Beneficio	3,6	6,7	81,8	1,7	112.378	561.889

Consumo de petróleo por baja eficiencia Evaporadores					Máximo Consumo Petróleo		USD/AÑO
					ton/mes	USD/Mes	
	Enero-Julio 2015				0,00	0	
	Agosto-Dic 2015				441,36	144.103	
	Beneficio					144.103	720.513

Menor producción por alto nivel de licor negro débil, baja eficiencia de Evaporadores.					Pérdidas Producción		USD/AÑO
					ADT	USD/año	
	2015				1.343,90	268.780	
	Beneficio					268.780	268.780

10.2 **Análisis de licor negro concentrado. Razón carbonato/sulfato.**

Se define la razón carbonato/sulfato de la siguiente forma en Planta Constitución:

$$\text{Razón molar} = \frac{CO_3}{SO_4 + CO_3} = \frac{\% \frac{SO_4(b.s)}{PM}}{\% \frac{SO_4(b.s)}{PM} + \% \frac{CO_3(b.s)}{PM}}$$

Esta razón indicará en que región (posible) precipitaría la correspondiente sal de sodio. A continuación se muestran los valores entregados desde Planta Nueva Aldea a Planta Constitución relacionados al análisis de licor negro concentrado, indicando que región estaría precipitando y causando ensuciamiento en concentradores. A continuación se presentan los valores del año 2015.

Fecha	2-2-15	9-2-15	16-2-15	23-2-15	2-3-15
Tipo Licor	Licor Negro Concentrado	Licor Negro Concentrado	Licor Negro Concentrado	Licor Negro Concentrado	Licor Negro Concentrado
Sólidos	70,43	64,5	66,58	64,58	65,09
Sulfato (%SO4 b.s)	1,86	1,38	1,85	1,68	1,85
Carbonato (% CO3 b.s)	3,31	3,65	4,03	3,86	4,14
Razón Molar CO3/(SO4 + CO3)	0,74	0,81	0,78	0,79	0,78
Condición Muestra por Razón Molar	Burqueita+BiCarbonato	Burqueita+BiCarbonato	Burqueita+BiCarbonato	Burqueita+BiCarbonato	Burqueita+BiCarbonato

Fecha	9-3-15	16-3-15	23-3-15	30-3-15	6-4-15
Tipo Licor	Licor Negro Concentrado	Licor Negro Concentrado	Licor Negro Concentrado	Licor Negro Concentrado	Licor Negro Concentrado
Sólidos	66,32	61,43	64,74	68,44	67,58
Sulfato (%SO4 b.s)	1,38	1,65	1,78	1,43	1,53
Carbonato (% CO3 b.s)	4,56	4,41	4,3	4,62	4,32
Razón Molar CO3/(SO4 + CO3)	0,84	0,81	0,79	0,84	0,82
Condición Muestra por Razón Molar	Bicarbonato	Burqueita+BiCarbonato	Burqueita+BiCarbonato	Bicarbonato	Burqueita+BiCarbonato

Fecha	13-4-15	18-5-15	25-5-15	1-6-15	8-6-15	15-6-15
Tipo Licor	Licor Negro Concentrado	Licor Negro Concentrado	Licor Negro Concentrado	Licor Negro Concentrado	Licor Negro Concentrado	Licor Negro Concentrado
Sólidos	70,88	64,72	65,24	66,36	65,23	63,76
Sulfato (%SO4 b.s)	1,66	1,68	1,54	1,51	1,4	1,59
Carbonato (% CO3 b.s)	4,42	4,26	5	5,19	5,27	4,27
Razón Molar CO3/(SO4 + CO3)	0,81	0,80	0,84	0,85	0,86	0,81
Condición Muestra por Razón Molar	Burqueita+BiCarbonato	Burqueita+BiCarbonato	Bicarbonato	Bicarbonato	Bicarbonato	Burqueita+BiCarbonato

Fecha	22-6-15	30-6-15	13-7-15	3-8-15	10-8-15	7-9-15
Tipo Licor	Licor Negro Concentrado	Licor Negro Concentrado	Licor Negro Concentrado	Licor Negro Concentrado	Licor Negro Concentrado	Licor Negro Concentrado
Sólidos	65,98	65,21	66,76	64,61		64,71
Sulfato (%SO4 b.s)	1,49	1,38	1,27	2,52		2,29
Carbonato (% CO3 b.s)	4,17	4,39	4,54	4,26	Muestra extraviada	4,7
Razón Molar CO3/(SO4 + CO3)	0,82	0,84	0,85	0,73		0,77
Condición Muestra por Razón Molar	Burqueita+BiCarbonato	Bicarbonato	Bicarbonato	Burqueita+BiCarbonato		Burqueita+BiCarbonato

Fecha	27-10-15	2-11-15	28-12-15
Tipo Licor	Licor Negro Concentrado	Licor Negro Concentrado	Licor Negro Concentrado
Sólidos	65,17	61,96	63,36
Sulfato (%SO4 b.s)	2,03	2,03	1,09
Carbonato (% CO3 b.s)	4,52	4,57	4,02
Razón Molar CO3/(SO4 + CO3)	0,78	0,78	0,86
Condición Muestra por Razón Molar	Burqueita+BiCarbonato	Burqueita+BiCarbonato	Bicarbonato

Bibliografía

- [1] PERRY, H.R., CHILTON, C.H., Perry's Chemical Engineers' Handbook, 8^aed, McGraw-Hill. (2008).
- [2] GRACE, T.M, MALCOM, E.W. Pulp and Paper Manufacture-Volume 5: Alkaline Pulping. Published by Technical Section Canadian Pulp & Paper Association. 3rded. (1983).
- [3] ANDREUCETTI, M.T.; LEITE, B.S.; D'ANGELO, J.V.H.; Eucalyptus Black Liquor-Density, Viscosity, Solids and Sodium Sulfate Contents Revisited Papet, v.72, num.12, pp. 52-57, Dezembro (2011).
- [4] CARDOSO, M.; OLIVEIRA, E.D.; COSTA, G.A.A.; PASSOS, M.L. Chemical process simulation for minimizing energy consumption in pulp mills. Applied Energy, vol.86, p.45-51. (2009).
- [5] TORNIANEN, R.; ULOTH, V.; WONG, P. Black liquor Characterization – Initial Studies. International Chemical Recovery Conference, p. 631-642, (2007).
- [6] GULLICHSEN, J; FOGELHOLM, C.J Papermarking Science and Technology Book 6: Chemical Pulping. Fapet Oy, Helsinki, Finland. (2000).
- [7] INCROPERA, F.P. e WIIT, D.P., “Fundamentos de transferencia de calor e massa- 3^a edição”, Guanabara Koogan, Rio de Janeiro, (1992).
- [8] GULLICHSEN, J; FOGELHOLM, C.J Chemical Pulping (Book 6B). Papermarking Science and Technology Book 6: Chemical Pulping. Fapet Oy, Helsinki, Finland. (1999).
- [9] VENKATESH, V; NGUYEN, X.N., “Evaporation and Concentration of Black Liquor”. In : Green, R.P., Hough, G., Chemical Recovery in the Alkaline Pulping Process, 3^a ed., Chapter 2, TAPPI Press, Atlanta, USA. (1992).

-
- [10] FREDERICK, SHI, B. & EUHUS, D., Crystallization and control of sodium salt scales in black liquor concentrators. Tappi journal, 3(6), p. 7-13, (2004).
- [11] SCHMIDL, W. & FREDERICK. Currents trends in evaporator fouling. In international Chemical Recovery Conference. Tampa, Florida, p.367-377, (1998).
- [12] MULLIN, J.W., Crystallization, 4th ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, (2001).
- [13] SHI, B., and ROUSSEAU, R.W., "Crystal Properties and Nucleation Kinetics from Aqueous Solutions of Na_2CO_3 and Na_2SO_4 ," Industrial and Engineering Chemistry Research, (2001).
- [14] SHI, B. FREDERICK, W.J.JR. , and ROUSSEAU, R.W., "Nucleation, Growth, and Composition of Crystals Obtained from Solutions of Na_2CO_3 and Na_2SO_4 ," Industrial and Engineering Chemistry Research.
- [15] SHI, B, "Crystallization of solutes that lead to scale formation in black liquor evaporation". Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology. (2002)
- [16] CLAY.T.D., "Evaporator Fouling", Lake Oswego, (2008).
- [17] ADAMS, T., "Sodium salt scaling in black liquor evaporator and concentrators. Tappi (2001).
- [18] SHI, B. FREDERICK, W.J.JR. , and ROUSSEAU, R.W., "Effects of Calcium and Other Ionic Impurities on the Primary Nucleation of Burkeite," Industrial and Engineering Chemistry Research (2003).
- [19] LANSDELL, G.M., FREDERICK, W.J.JR., SCHIMIDL, W., EUHUS, D.D., "An investigation of the Accelerated CaCO_3 Fouling in Evaporators Processing Black Liquor from Displacement Batch Kraft Pulping, "TAPPI Pulping Conf., Session 59, Boston (2000).
- [20] CAMPOS, S.; Modelagem Matemática e Análise do Coeficiente Global de Transferencia de Calor para o Processo de Concentração Do Licor Negro de
-

- Eucalipto em Sistema de Evaporadores de Múltiplo Efeito. Dissertação (Mestrado) – Unileste, Centro Universitário do Leste de Minas Gerais, Coronel Fabriciando, MG (2009).
- [21] GULLICHSEN, J., PAULAPURO, J., and FOGELHOLM, C. J. "Chemical Pulping", Paper Making Science Technology, Finnish Paper Engineers' Association and TAPPI, (1992).
- [22] CLAY T; DAVID. "Evaporator fouling", Senior Process Consult".
- [23] SCHMIDT R. "The effect of wood chip inventory rotation policies on storage costs, chip quality and chip variability. Tappi Journal, (1990).
- [24] TECHLINE. "Salt damage to wood. Fungal wood often confused with fungal decay".
- [25] SCHNEIDER, P.T; FREITAG, C.M; MORRELL, J.J; "Decay resistance of saltwater –exposed douglas-Fir Piles".
- [26] Archivos de inducción, Planta Constitución. (2016).
- [27] Imagen Planta evaporadores, Celulosa Arauco y Constitución, Planta Constitución (Celco). (2016).
- [28] <http://www.eis.uva.es/~macromol/curso08-09/pls/fase.htm>
- [29] Manual de operaciones Planta evaporadores, Celulosa Arauco y Constitución, Planta Constitución.