EFECTOS DE LA SOBRECARGA DE LICOR NEGRO EN EL BLANQUEO DE LA PULPA

Víctor Estrada[1], Roberto Melo[1], Miguel Lozano[2]

[1]Depto. Ingeniería Química - Facultad de Ingeniería - Universidad de Concepción
[2]CMPC-Celulosa Planta Santa Fe.

RESUMEN

El licor negro sobrecargado o arrastrado (*carryover*), es aquel que luego del lavado posterior a la cocción, permanece adherido a la fibra, siendo arrastrado hacia las etapas de deslignificación y blanqueo, en las cuales presenta diversos efectos cuya determinación y evaluación son objetivo del presente estudio.

Midiendo la sobrecarga de licor negro como COD, se contaminó una pulpa cocida, lavada al infinito, con licor negro crudo en el rango 0 a 250 kgCOD/BDt y pulpa deslignificada con licor negro oxidado, en el rango 0 a 67 kgCOD/BDt. Con éstas, se realizaron ensayos de deslignificación y blanqueo ECF con la finalidad de cumplir el objetivo antes señalado. Junto con lo anterior, se simuló el proceso de lavado hecho en planta, con el fin de conocer el efecto de la dilución y calidad de aguas de lavado en la reducción del COD en la pulpa.

Mediante un diseño estadístico unifactorial y aplicando un análisis de varianza se ha obtenido objetividad en los resultados, los cuales señalan que al aumentar el nivel de licor negro sobrecargado, produce una baja en la selectividad de la deslignificación con oxígeno, manifestada por un aumento del kappa de salida y caída de la viscosidad, consumiendo más reactivo a medida que aumenta la sobrecarga. Con esto se estima que para los niveles de licor sobrecargado de120 kg/BDt, una reducción de 40 kgCOD/BDt produce un ahorro cercano a los 6 kg O_2/BDt.

Durante la secuencia de blanqueo ECF, se obtiene un mayor efecto en la etapa D_0, donde una mayor sobrecarga aumenta el kappa, disminuye la blancura, aumenta el consumo de dióxido de cloro y retarda la velocidad de reacción entre dióxido de cloro y lignina. El efecto continúa durante la extracción alcalina y etapa D_1, principalmente disminuyendo la blancura final del producto la cual, a un nivel de sobrecarga de 47 kgCOD/BDt, no supera los 87°ISO.

Se propone un mejoramiento del proceso de lavado, mediante una nueva configuración de las aguas de lavado. Esto permitiría reducir el arrastre de licor negro en un 35% a la entrada de la deslignificación y del orden de un 27% para blanqueo, con lo que se ahorra, principalmente, un 26% de oxígeno y un 15% de dióxido de cloro.

1. INTRODUCCIÓN.

Dentro del proceso de producción de celulosa de alta calidad adquiere gran importancia la blancura que se alcance en el producto final. Es aquí donde las etapas de deslignificación con oxígeno y la secuencia de blanqueo de la pulpa, juegan un rol clave dependiendo de las condiciones bajo las cuales se realiza cada una de ellas.

Dentro de estas condiciones, luego de la cocción, se hace necesaria la eliminación del *licor negro sobrecargado (carryover)* en la pulpa, adherido tanto a la superficie de la fibra como en el lúmen de ella, ya que este contiene impurezas solubles, químicos de cocción y material orgánico disuelto que afecta el proceso posterior.

Investigaciones recientes señalan que la presencia de este material orgánico, medido como COD (Chemical Oxygen Demand), presente en la pulpa que entra a la deslignificación con oxígeno, afecta la selectividad de esta etapa y aumenta el consumo de oxígeno. Por otro lado cuando el lavado posterior a la deslignificación no elimina el licor negro oxidado en forma eficiente, este es arrastrado a la planta de blanqueo produciendo efectos, principalmente, en el consumo de reactivos y blancura del producto.

Debido a lo anterior, evitar la sobrecarga de licor negro en la pulpa a través el lavado de ella, resulta fundamental. Sin embargo, el flujo de agua de lavado utilizado debe ser determinado con precaución, ya que el licor negro junto con los filtrados de lavado que contienen licor negro arrastrado por la pulpa, son enviados al circuito de recuperación de reactivos y energía, donde se requiere concentrarlo en la planta de evaporadores, para su posterior combustión; por lo tanto es necesario considerar la capacidad de ésta, sin alterar en forma significativa los costos de energía relacionados.

Este estudio evalúa los efectos de la sobrecarga del licor negro en el blanqueo de una pulpa kraft de eucalipto, para finalmente proponer un mejoramiento del proceso que permita obtener utilidades entre ahorro de reactivos y energía requerida.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Evaluar los efectos de la sobrecarga de licor negro en el blanqueo de una pulpa kraft de eucalipto.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Evaluar los efectos de la sobrecarga de licor negro en la selectividad de la deslignificación con oxígeno, determinando además el consumo de este reactivo durante la etapa.
- Evaluar los efectos de la sobrecarga de licor negro en el índice kappa, blancura y consumo de dióxido de cloro en la secuencia de blanqueo $D_oE_{op}D_1$.
- Investigar los efectos de la sobrecarga de licor negro en la velocidad de deslignificación con dióxido de cloro en la etapa D_0.
- Evaluar los efectos de la sobrecarga de licor negro en la blancura final, reversión y viscosidad de la celulosa como producto.
- Determinar la relación entre razón de dilución en el lavado de la pulpa con la reducción de licor negro arrastrado.
- Plantear mejoramiento del proceso que permita optimización económica entre lavado, ahorro de reactivos y consumo de energía.

2. ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

2.1 Blanqueo de pulpas químicas

El propósito fundamental de las operaciones realizadas en una planta de blanqueo es llegar a producir una pulpa con propiedades físicas y químicas que permitan su posterior utilización. Una de estas propiedades que adquiere principal importancia es la blancura.

Para que un compuesto químico se aprecie coloreado debe absorber energía radiante de longitud de onda que pertenezca a la fracción visible del espectro. Lo anterior ocurre cuando en el compuesto aparece ciertos grupos químicos denominados cromóforos y auxocromos. [11]

Debido a que los carbohidratos presentes en la pulpa son de color blanco y la lignina absorbe las ondas luminosas sólo en la banda ultravioleta no visible al ojo humano se deduce que la formación de cromóforos ocurre en operaciones previas a la producción de pulpa cruda. Trabajos recientes revelan la formación de cromóforos durante la cocción alcalina debido a la degradación de carbohidratos [3].

El blanqueo se puede lograr de dos maneras [11]:

a) Por destrucción de los grupos coloreados, sin extraer la lignina residual, que es su portadora,
b) Por extracción de la lignina residual.

Esto se realiza en secuencias bien definidas que emplean reacciones tendientes a solubilizar o modificar el material coloreado y lavados intermedios que evitan la interacción entre reactivos y productos de las reacciones involucradas.

Una de las secuencias más utilizadas en la producción de celulosa blanqueada es la ECF (Elemental Chlorine Free) que utiliza sólo dióxido de cloro como agente blanqueante el que reacciona con la lignina remanente y la fragmenta.

Junto con lo anterior se está aplicando una etapa adicional, previa al blanqueo final de la pulpa, de deslignificación con oxígeno que presenta numerosas ventajas que se señalan a continuación.

2.2 Deslignificación con oxígeno.

Entre los principales beneficios que conlleva la utilización de la deslignificación con oxígeno se encuentran:

- Notable reducción de contaminación de las plantas, encontrándose que para efluentes de latifoliada, la BOD_5 y COD presentaban una reducción entre un 40 y 55% y el color entre un 75 y 85%. [18]
- Se obtiene una considerable reducción de costos por químicos tanto en cloro como en álcali ya que el contenido de lignina se reduce cerca de un 40 a 50%, por lo que se requiere menos reactivos para alcanzar la blancura final deseada. [9]
- En la fabricación de oxígeno se consume sólo 1/8 de la energía requerida para obtener la cantidad equivalente de cloro.[11]

Todos estos beneficios mostrados, deben corresponderse con adecuadas condiciones bajo las cuales se realiza la deslignificación con oxígeno. Fundamental importancia adquiere también el lavado que se haga de la pulpa en su entrada a los reactores de oxígeno ya que como se señala más adelante, la ineficiencia de éste proceso trae como consecuencia un arrastre de licor negro a la deslignificación cuyas consecuencias se señalan a continuación.

2.2.1 Efecto de la sobrecarga de licor negro en la deslignificación con oxígeno.

Al optimizar la eficiencia de la remoción de lignina por la deslignificación con oxígeno, es necesario considerar lo importante que es la cantidad de sólidos disueltos sobrecargados al reactor

en que se realiza esta operación. Un importante criterio para el diseño de la deslignificación con oxígeno a media consistencia es el número de etapas de lavado pre y post oxígeno, donde cada una de ellas influirá en el tipo y cantidad de sólidos disueltos que serán llevados al reactor.

Un sistema a media consistencia tiene dos tipos de sólidos disueltos identificables [12] que son:

1. ***Sólidos de licor negro crudo (SLNC):*** Sólidos disueltos llevados por la línea de pulpa desde el digestor y lavado preoxígeno. Estos sólidos no han ingresado aún al reactor.
2. ***Sólidos oxidados (SO):*** son los sólidos disueltos descargados desde el reactor. Estos sólidos son la suma de sólidos SLNC llevados dentro del reactor y los resultantes desde el proceso de deslignificación.

En un sistema a media consistencia, los sólidos LNC y oxidados se combinan para resultar en el nivel total de sólidos disueltos que ingresan al reactor donde el grado de lavado pre y post oxígeno determinaría no sólo la cantidad sino también la razón entre ellos.

Investigaciones sobre la secuencia de lavados pre y post oxígeno para una deslignificación típica del 45% [12],encontró que 3 etapas de lavado preoxígeno y 2 etapas post oxígeno resultan en un más bajo nivel de licor negro sobrecargado y la más pequeña razón SLNC/SO.

Dentro de estos antecedentes fue estudiado el comportamiento de la deslignificación con oxígeno reforzada con soda alcanzando un 46.2% de deslignificación para una pulpa de conífera, dependiendo de la carga de estos sólidos al reactor. Manteniendo las condiciones de operación constantes, se adicionó SLNC en un rango de 15 a 300 kg/ton los resultados señalan una caída de la selectividad a niveles sobre 100 kg SLNC/ton manifestado por un aumento del kappa final y caída de la viscosidad.

Resultados análogos fueron encontrados por Parthasarathy [15] quien estudió el ingreso de sólidos en licor negro sobre la velocidad de deslignificación y la viscosidad final de una pulpa kraft de pino a una consistencia de 15% deslignificada con oxígeno y reforzada con peróxido de hidrógeno.

Por otro lado, también se ha estudiado el efecto de estos dos tipos de licor negro sobre la selectividad y consumo de oxígeno [19], encontrándose que de estos, es el licor LNC quien tiene un efecto más significativo en la selectividad de la deslignificación, ya que al cargar la pulpa con un COD entre 0 y 200 kg/BDt y con una carga de soda de 22,5 kg/BDt, el kappa aumenta desde 15,4 a 18,3, en tanto que la viscosidad intrínseca cae desde 905 ml/g a 865 ml/g; con respecto al consumo de oxígeno se observa un notable aumento para lograr un porcentaje de deslignificación objetivo.

2.3 Efectos de la sobrecarga del licor negro en el blanqueo.

Las mejoras en los procesos de blanqueo han significado en la mayoría de los países de Europa la total eliminación del tradicional proceso basado en cloro elemental, reemplazándose con la secuencia ECF (Elemental Chlorine Free) ó TCF (Totally Chlorine Free). En particular el proceso ECF, el cual utiliza dióxido de cloro como agente blanqueante, ha permitido una reducción de residuos de compuestos clorados en más de un 90% respecto del proceso tradicional [6], esto ha fomentado su utilización y actualmente, pese a que su costo es alto, es uno de los principales reactivos de blanqueo.

Gracias a su capacidad oxidante, el dióxido de cloro fácilmente reacciona con la lignina en la pulpa produciendo su degradación, sin embargo debido a que éste es altamente reactivo, también es capaz de reaccionar con otros tipos de compuestos presentes, los cuales han sido generados y arrastrados desde etapas anteriores.

Una vez que la pulpa es cocida en el digestor, es descargada de éste junto con el licor gastado durante el proceso de cocción, llamado licor negro, que se forma durante esta operación y que posteriormente es quemado para recuperación de energía y químicos.

La composición del licor negro depende principalmente de la madera utilizada en la producción de pulpa. Trabajos realizados sobre el fraccionamiento y análisis de los componentes

orgánicos de un licor negro obtenido en una industria con proceso kraft que emplea Eucalyptus globulus como materia prima [16], permitió separar los componentes del licor en fracciones, donde los diversos compuestos que forman el licor, pueden ser distribuidos en seis grupos mayores: lignina, compuestos solubles en eter, tales como ácidos aromáticos, compuestos fenólicos y neutros, como también compuestos solubles en agua como carbohidratos, ácidos carboxílicos alifáticos cuyas concentraciones son presentadas en la tabla 2.2. Sin embargo, al analizar cada una de estas fracciones, excepto la lignina, mediante cromatografía de gases y espectrometría de masa, se logró la identificación de más de 60 compuestos, que a modo de ejemplo se presenta la tabla 2.3 con respecto a los compuestos fenólicos.

Tabla 2.2: Composición orgánica del licor negro.

Fracción	Concentración (g/L)	Sólidos secos (%)
Lignina	103.22	42.5
Ácidos aromáticos	1.19	0.5
Compuestos fenólicos	0.34	0.1
Compuestos neutros	0.07	0.0
Ácidos alifáticos	13.88	5.7
Carbohidratos	3.86	1.6
Total	122.56	50.4

Los conocimientos de la composición del licor negro son importantes para el control eficiente de la planta y para el diseño y control de calderas recuperadoras, puesto que las propiedades de combustión del licor negro concentrado son determinadas por la composición química de los constituyentes orgánicos. Sin embargo, dependiendo de la eficiencia del lavado de la pulpa no blanqueada una considerable fracción de los componentes del licor negro pueden ser enviados a la planta de blanqueo, como sobrecarga disuelta en la pulpa o adsorbida sobre la fibra.

Tabla 2.3: Composición de la fracción de compuestos fenólicos en licor negro.

Compuesto	Abundancia relativa (%)
Ácido láctico	5.14
Siringol	21.74
Acetovinilona	3.57
Siringaldehido	4.91
2,6-Dimetoxihidroquinona	1.14
Acetosiringona	15.23
Vanillic acid	2.78
3-Vanillic acid	2.75
Acetosiringona (forma enólica)	2.63
2-Siringiletanol	1.81
3-Siringilpropanol	0.43
Ácido palmítico	2.5
1-Guayacol-1'-siringiletano	1.45
1,1'-Disiringilmetano	1.43
Dihidrodiguaiacol	3.66
Siringaresinol	2.12
Total	79.21

Bajo estas circunstancias puede llegar a ocurrir la acumulación de compuestos orgánicos en la línea de pulpa, particularmente los compuestos de bajo peso molecular existentes en la madera inicial (extraíbles) o formados en las reacciones de pulpaje, pudiendo causar problemas, como aumento en el consumo de químicos y riesgo de formación de pitch y deposición sobre pulpa

y equipos.[16]

Los resultados del fraccionamiento del licor negro resumido en la tabla 2 muestran que la lignina es quien domina la composición orgánica con una concentración de 103.2 g/L. Después de la lignina, los ácidos carboxílicos alifáticos provenientes principalmente de la degradación alcalina de polisacáridos constituye la fracción más abundante(13,9 g/L), seguidos por los carbohidratos. Las fracciones combinadas de compuestos solubles en eter etílico (ácidos aromáticos, fenólicos y compuestos neutros) provienen esencialmente de degradación de lignina.

Por lo tanto, debido a la composición del licor negro es que se hace necesario removerlo desde la pulpa una vez que es descargado, puesto que su presencia da lugar a múltiples reacciones simultáneas y complejas entre los reactivos de blanqueo y la lignina en la pulpa y el material orgánico disuelto en el licor. A modo de ejemplo se puede mencionar, tal como se observa en la tabla 2.3, que uno de los compuestos más abundantes es el siringol y sus derivados, presentes en licor de una pulpa kraft de Eucalipto globulus, el cual reacciona con el dióxido de cloro de acuerdo al esquema propuesto por McKague y Grey [10]. Esto demuestra que al cargar más licor negro y llevar una mayor carga orgánica producto de la presencia de estos compuestos como el siringol que va en el licor y no está presente en la pulpa a blanquear, dará lugar a un mayor consumo de reactivos para obtener una cierta blancura final, elevando los costos de operación de la planta de blanqueo.

Junto con lo anterior, existen estudios que señalan el efecto del licor negro sobrecargado en la cinética de deslignificación con ClO_2 [2], mostrando que una pulpa con mayor carga de COD presenta un aumento en la velocidad de consumo de dióxido, aunque sin un aumento notable en la velocidad de deslignificación.

2.4 Lavado de la pulpa

Así como se requiere que cada una de las etapas de deslignificación y blanqueo se realice en la forma más eficiente posible, es también necesario que el lavado de la pulpa entre estas etapas sea desarrollado en forma óptima. Los objetivos principales que busca ese proceso son:

a) la remoción del licor negro remanente en la pulpa,
b) la recuperación máxima de los reactivos con el mínimo de dilución y
c) recuperación máxima de los componentes orgánicos de la madera,

este último con la finalidad de aprovechar su alto poder calorífico.[1]

Por su parte el buen cumplimiento del primero de los objetivos antes señalados, tiene primordial importancia para las etapas posteriores del proceso de blanqueo, ya que una alta sobrecarga de licor negro dará lugar a los efectos que se han mencionado en las secciones anteriores.

Una pequeña revisión a las operaciones básicas del lavado pueden ayudar a comprender mejor el proceso y permitir encontrar mejoras a éste.

En el lavado de la pulpa se pueden identificar 2 operaciones básicas [4]: dilución/extracción y desplazamiento de lavado.

(a) **Dilución/extracción:** la pulpa sucia es diluida y mezclada completamente con licor de lavado débil o agua limpia y luego espesada por filtración, frecuentemente ayudada por una diferencia de presión aplicada al lecho de la pulpa, o por prensado, ver figura 2.7. La dilución/extracción no remueve todos los solutos sino se hace en forma repetida. La eficiencia de esta operación depende principalmente de la consistencia de la pulpa, grado de absorción del soluto en la fibra y tiempo requerido por el soluto para difundir fuera de ella.

(b) **Lavado por desplazamiento:** esta operación consiste en que el licor negro en la pulpa es

desplazado con licor de lavado más débil o agua limpia, figura 2.8. En un lavado por desplazamiento ideal, esto es que no exista mezclado, es posible remover todos los solutos desplazando un volumen de licor de lavado a través del lecho de la pulpa. En la práctica, la limpieza completa no se logra ya que en la interfase sólido/líquido existe mezclado y los sólidos que han sido absorbidos en la fibra no tienen el tiempo suficiente para difundir fuera de ella.

Figura 2.7: Lavado por dilución/extracción.

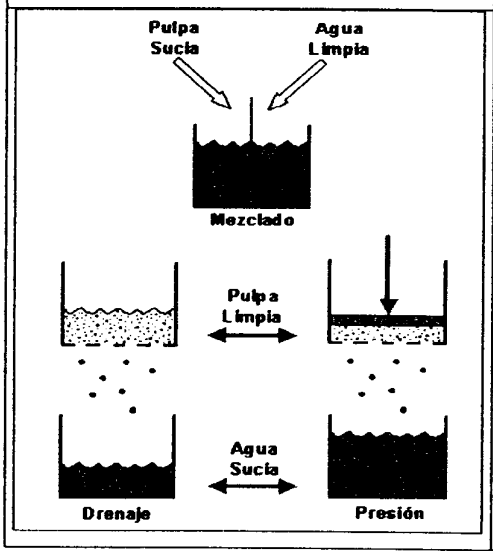
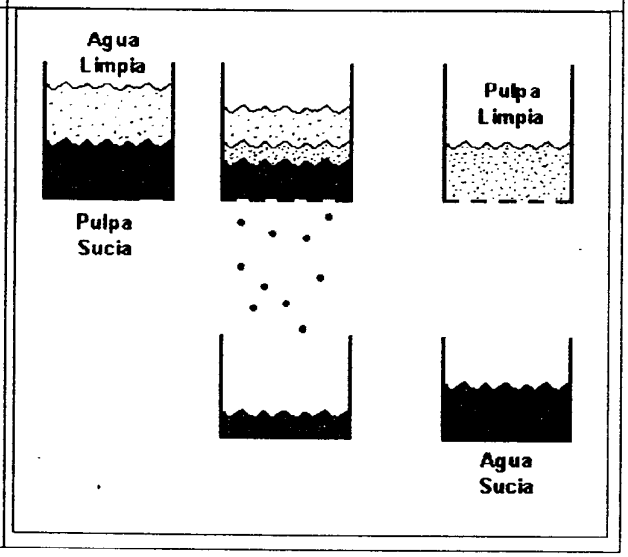


Figura 2.8: Lavado por desplazamiento.



Desde un punto de vista industrial el lavado de la pulpa se realiza tanto en sistemas discontinuos como continuos. Mientras que los discontinuos se utilizan en instalaciones más pequeñas, las plantas a mayor escala y modernas han optado por el sistema continuo, usando en su operación 2, 3 o más filtros rotatorios presurizados, o a vacío, en serie y con flujos en contracorriente.[11]

2.5 Descripción del proceso en Planta Santa Fe.

Planta Santa Fe produce celulosa blanca utilizando como materia prima Eucalyptus en sus especies globulus y nitens en proporciones definidas de acuerdo a tipo de producto que se desea satisfacer en el mercado.

La pulpa cocida por proceso Lo-Solids, es descargada del digestor con Kappa 16-18, consistencia 11-12%, para luego pasar por una serie de separadores de nudos, tamices finos y ajustes de consistencia (a 5%, luego a 3%) que la dejan en condiciones de entrar al primer filtro de lavado.

Ántes de que la pulpa clasificada entre a la planta de blanqueo, debe pasar por las etapas de lavado y deslignificación con oxígeno (ver figura 2.10) en cuya trayectoria se encuentra con 5 filtros rotatorios denominados P-30, P-31, CB-31, P-34 y CB-40. El lavado de la pulpa que entra a deslignificación se realiza en los primeros 3, cuyas aguas de lavado se desplazan en contracorriente provenientes de los filtros P-34 y CB-40 ubicados entre los reactores de oxígeno y la primera etapa de blanqueo.

Cada uno de estos filtros opera en forma similar, por ejemplo para P-31, la pulpa entra al filtro con una consistencia entre 3 y 3,5% poniéndose en contacto con el agua de lavado, que luego

de un rápido mezclado, se adhiere al tambor del filtro debido a la presión externa que se aplica al queque formado, aumentando su consistencia hasta ser descargada con un 14 a 16%. Durante la rotación, se logra el desplazamiento del licor negro sobrecargado hacia el interior del tambor, filtrándose un flujo que es producto del agua de lavado y de la concentración de la pasta. Este filtrado es bombeado hacia un estanque, para luego utilizarlo tanto como agua de lavado en el filtro P-30 como también para bajar la consistencia de descarga de éste.

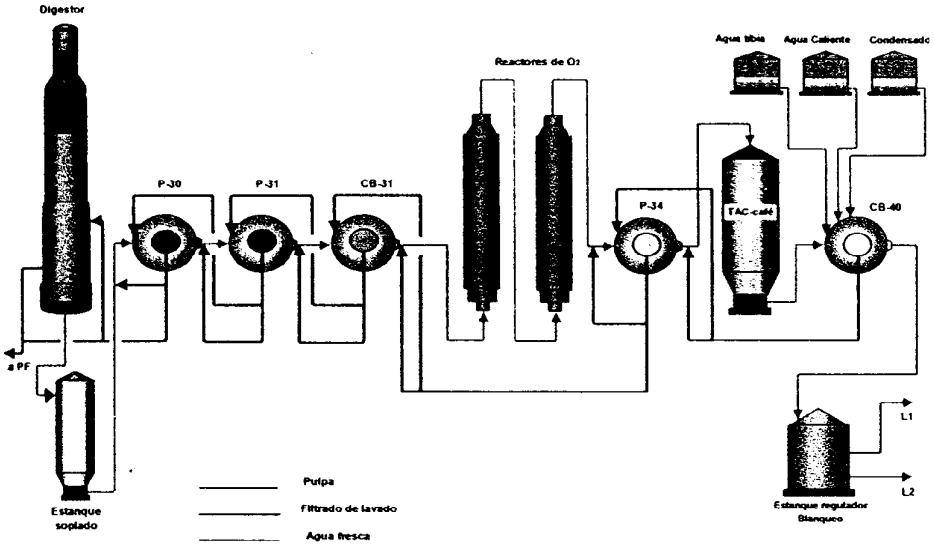
Como resultado del lavado en contracorriente la pulpa con mayor cantidad de licor negro que entra al presurizado 30 se lava con el agua más concentrada en sólidos, generándose en este equipo un filtrado que se envía al fondo del digestor, introduciendo un flujo constante que entra en contacto directo con la pulpa que es descargada. Otra parte del filtrado se mezcla con un flujo de licor negro que se extrae del fondo del digestor para ser enviado a evaporadores.

Por otro lado, la pulpa lavada que es descargada del filtro CB-31 se ajusta consistencia, para luego inyectar soda y ajustar pH quedando en condiciones de entrar al primer reactor donde comienza la deslignificación. Se pone en contacto con el oxígeno durante un tiempo de reacción de 30 minutos, a temperatura y presión definidas. Luego de este tiempo se descarga la pulpa a la que se ajusta un nuevo flujo de soda e introduce al segundo reactor de oxígeno, en el cual permanece bajo condiciones similares al primero, pero con un tiempo de reacción de 45 minutos, después del cual se alcanza alrededor de un 42% de deslignificación.

La pulpa deslignificada es lavada en el filtro 34, para luego ser enviada al estanque TAC-café que provee pulpa a la planta de blanqueo, pasando antes por el filtro CB-40 donde se utiliza como agua de lavado: condensado secundario, agua caliente y agua tibia, quedando en condiciones de entrar a las dos líneas de blanqueo.

Por último, luego de la secuencia aplicada, ECF o ST, se obtiene celulosa con una blancura de 91° ISO, la que es secada y embalada como producto final.

Figura 2.10: Proceso de lavado en Planta Santa Fe.



2.5.1 Situación actual en Planta Santa Fe.

Tal como se ha señalado en las secciones anteriores, el análisis de COD en el filtrado de la

pulpa permite conocer el arrastre de licor negro que está ingresando a la deslignificación con oxígeno, como a blanqueo lo que a su vez va relacionado con las consecuencias antes mencionadas y junto con esto, entrega una buena medición como respuesta del desempeño del lavado de la pulpa.

En la tabla 2.5 se muestran los promedios obtenidos en los análisis realizados [7], expresando el COD en kg por tonelada de pulpa seca procesada en planta.

Tabla 2.5: Niveles de COD en proceso de planta Santa Fe

Valor Estadístico	COD Digestor (kg/BDt)	COD Reactor O_2 (kg/BDt)	COD Blanqueo (kg/BDt)
Promedio	3800	123	45

Al comparar el nivel promedio en cada punto, con los encontrados en literatura, se pueden considerar que están dentro de los rangos estudiados. Sin embargo, es necesario considerar que estos valores presentan variaciones cuyos niveles altos son dañinos para la producción y en base a la revisión de éstos datos, se puede afirmar que no pocas veces se ha trabajado en ellos.

Por lo tanto, al considerar las consecuencias del arrastre de licor negro presentado en las secciones anteriores, es conveniente revisar, estudiar y evaluar los efectos provocados por éste en el proceso.

3. METODOLOGÍA DE TRABAJO

Mediante un diseño unifactorial y un análisis estadístico de varianza se ha investigado el efecto del arrastre de licor negro sobre la deslignificación y blanqueo. Este análisis se basa en la comparación de las medias de los tratamientos realizado en cada uno de los experimentos con un número determinado de observaciones o réplicas. [13]

Para estudiar experimentalmente el efecto del arrastre de licor negro en el blanqueo de la pulpa se realiza una serie de ensayos con Pulpa kraft de Eucalyptus formada por una mezcla de las especies globulus y nitens cocida en proceso Lo-Solids.

Al considerar blanqueo de la pulpa, se estudia tanto la deslignificación con oxígeno como también la secuencia de blanqueo ECF, $D_0E_{op}D_1$, por lo tanto la pulpa a utilizar es de dos tipos:

1. Pulpa cocida muestreada a la entrada de los reactores de oxígeno.
2. Pulpa deslignificada muestreada a la entrada de planta de blanqueo.

Por otro lado, considerando la secuencia del proceso, es necesario emplear los 2 tipos de licores:

1. Licor negro crudo: obtenido de la última extracción del digestor,
2. Licor negro oxidado: obtenido del filtrado de la pulpa que es descargada de los reactores de oxígeno.

La pulpa utilizada se caracteriza de acuerdo a su kappa, viscosidad, blancura, COD y soda, en tanto que del licor negro se analiza su carga de COD, % sólidos secos y álcali.

Pulpa cocida lavada con abundante agua limpia se procede a contaminar con licor negro crudo en el rango 5 a 250 kg/BDt, para luego someter al proceso de deslignificación bajo las condiciones señaladas en la tabla 3.2. Al término de la etapa se mide índice kappa, viscosidad, selectividad (por cálculo), pH y presión final en el reactor.

Tabla 3.2: Condiciones de operación para la deslignificación con oxígeno.

Variable	Condición
Consistencia (%)	11
NaOH (kg/BDt)	20
T (°C)	95
Presión (bar)	5
Tiempo de reacción (min)	75

La deslignificación se realiza en un reactor de acero inoxidable con camisa calefactora, agitador e indicador de presión.

Pulpa deslignificada y lavada se contamina con licor negro oxidado, en el rango 4 a 67 kgCOD/BDt para luego someterla a la secuencia de blanqueo bajo las condiciones establecidas en la tabla 3.4.

Tabla 3.4: Condiciones de operación del blanqueo.

Variable	D_0	E_{op}	D_1
Consistencia (%)	10	10	10
ClO_2 (kg/BDt)	9	-	4
NaOH (kg/BDt)	-	12	-
T (°C)	85	75	70
Presión (kg/cm^2)	1	3	1
PH entrada	4	12	3.5
Tiempo retención (min)	120	85	180

Adicionalmente, se investiga la influencia del COD en la deslignificación con ClO_2, realizando ensayos con 2 niveles de carga de COD, 4 y 47 kg COD/BDt, registrando el ClO_2 residual y kappa a distintos tiempos de reacción.

Para la simulación del proceso de lavado, se ha utilizado el parámetro razón de dilución, definido como el cuociente entre el flujo de agua de lavado y el licor que es arrastrado por la pulpa lavada que sale del filtro.

A la pulpa se aplica 3 razones de dilución, la actual de la planta (RD), una disminuida en un 30% y otra aumentada en un 60% con respecto a la actual, simulando la secuencia de lavado realizada en filtros antes de entrar a deslignificación y antes de entrar a blanqueo.

Las propiedades de la pulpa y del licor se determinan a partir de la norma respectiva o metodología utilizada en planta, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 3.10: Determinación de propiedades de pulpa y licor.

Análisis	Norma
Kappa	Tappi T236 cm-85
Microkappa	Tappi UM 246
Viscosidad	Tappi T230 OM-89
Blancura	Tappi 525 om-92
Reversión	Tappi UM 200
COD	CPPA (Canadian Pulp and Paper Asoc.) Standard H.3P

Para el análisis de COD se utilizan dos metodologías en paralelo, la norma ya mencionada y haciendo uso del filtrado directo de la pulpa al que se le mide COD. Se encuentra que la diferencia entre ambas es de un 2,5%, por lo que se opta por la medición al filtrado ya que requiere un menor tiempo de preparación de la muestra.

4. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados experimentales y teóricos que dan cumplimiento a los diferentes objetivos planteados. Durante esta sección sólo se mostrarán y realizarán algunos comentarios, para luego hacer un análisis más profundo en el punto 5.

4.1 Análisis de la pulpa y licores.

En las siguientes tablas se presentan las características de las pulpas y licores utilizados en los experimentos.

Tabla 4.1: Características iniciales de las pulpas.

Propiedad	Pulpa cocida	Pulpa deslignificada
Número Kappa	16.1	9.6
Viscosidad (cp)	63.9	29.9
Blancura (°ISO)	40.7	59
COD (kg/BDt)	5	4

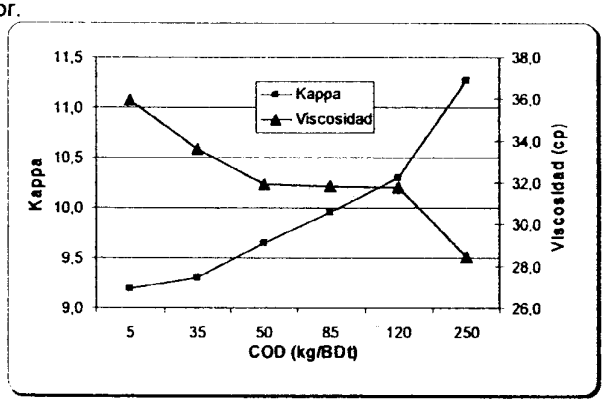
Tabla 4.2: Características iniciales de los licores.

Propiedad	LNC	LNO
COD (g/L)	157	8.7
% sólidos secos	17.1	2.0
Álcali efectivo gNaOH/L	18.7	0

4.2 Efectos de la sobrecarga de licor negro en la deslignificación con oxígeno.

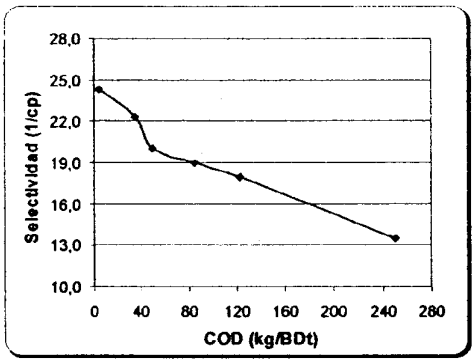
La sobrecarga de licor negro en la pulpa que entra a deslignificación tiene un efecto sobre el índice kappa, aumentándolo, bajo las condiciones y rangos estudiados, desde un 9.3 hasta un 11.3 para la carga máxima de COD utilizado, tal como lo muestra la figura 4.1. En esta misma, además se observa el efecto del factor en estudio sobre la viscosidad, manteniéndose aproximadamente constante entre los 50 y 120 kg/BD con un valor alrededor de 32 cp, para finalmente mostrar una reducción hasta 28 cp para el nivel mayor.

Figura 4.1: Efectos del licor negro sobrecargado en la deslignificación con Oxígeno.



Como consecuencia de lo encontrado en la figura 4.1, es posible calcular la selectividad de la deslignificación, como cuociente entre la variación del índice kappa y la variación de viscosidad. Este resultado es mostrado en la figura 4.2 que señala una caída de la selectividad porcentual desde un 24,3 hasta un 13,5.

Figura 4.2: Efecto del licor negro sobrecargado en la selectividad de la deslignificación con oxígeno.



Los resultados encontrados sobre el pH de salida en la deslignificación son presentados en la figura 4.3, la cual señala una caída de éste desde 11,3, correspondiente a una pulpa completamente lavada, hasta un 9,1 para la sobrecarga máxima.

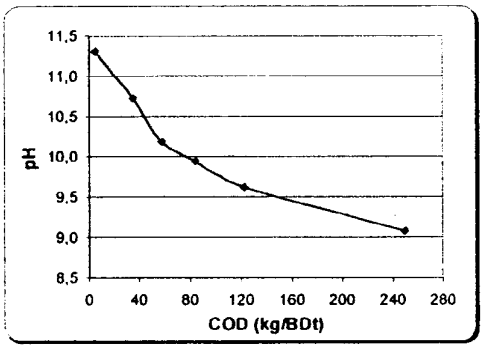
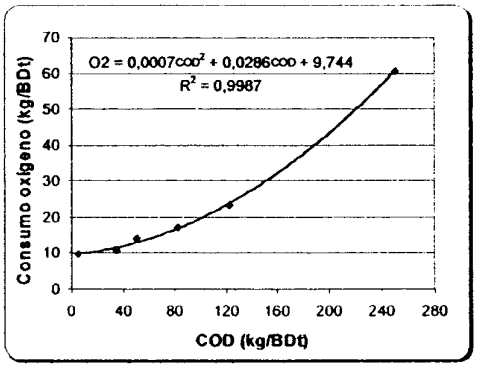


Figura 4.3: Efecto del licor negro sobrecargado en el pH de salida en la deslignificación con oxígeno.

Pese a que el oxígeno es un reactivo barato, conviene revisar la dependencia del gasto con el nivel de licor negro sobrecargado.

Tal como lo muestra la figura 4.4 el aumento de consumo es evidente y significativo, lo que, considerando la elevada producción que posee la planta, se transforma en una importante cantidad de toneladas anuales.

Figura 4.4: Efecto del licor negro sobrecargado en el consumo específico de oxígeno.



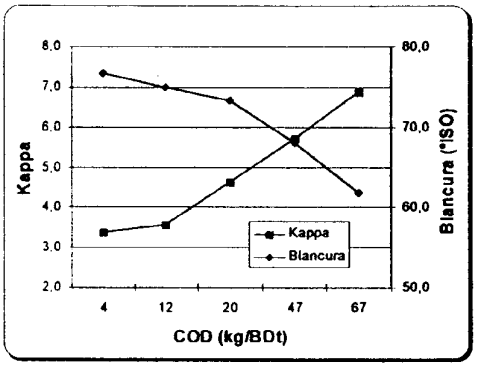
4.3 Efectos sobre el blanqueo de la pulpa.

4.3.1 Efectos sobre la etapa D_0.

Las principales respuestas al proceso de blanqueo corresponden a los índices kappa y blancura. Tal como lo señala la figura 4.5, se observa que el comportamiento de estos parámetros es inverso. Para un mismo kappa de entrada de 9.6, el kappa de salida de esta etapa tiende a aumentar a medida que la sobrecarga de licor negro es mayor.

Por otro lado la blancura alcanzada en esta etapa cae desde los 76.8 a 61.8 °ISO, aún cuando hay un aumento de la blancura con respecto a la que presenta la pulpa luego de la deslignificación con oxígeno, esta disminuye a medida que aumenta el arrastre de licor negro oxidado.

Figura 4.5(derecha): Efecto del licor negro Sobrecargado en la deslignificación y blancura alcanzada en la etapa D_0.



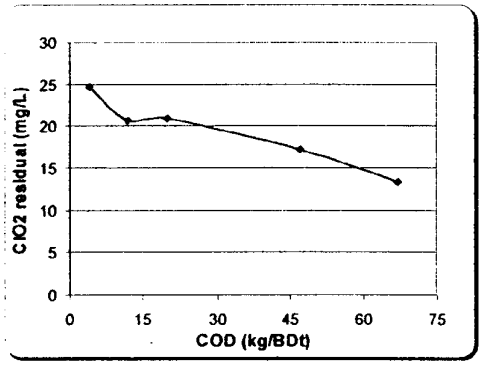
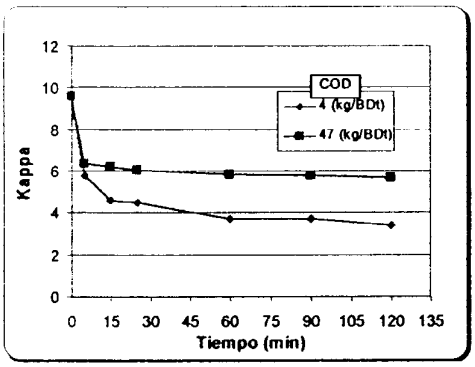


Figura 4.6(izquierda): Efecto del licor negro sobrecargado en el dióxido de cloro residual de la etapa D_0.

El consumo de dióxido de cloro fue registrado a través de la concentración de éste como residual. En al figura 4.6 se observa el mayor consumo de ClO_2 cuanto más elevada es la sobrecarga de licor negro, disminuyendo la concentración de dióxido a 12 mg/L para una pulpa que entra a blanqueo con una carga de 67 kg de COD por tonelada de pulpa seca.

Un factor importante para fines de producción es el tiempo que toma una reacción para alcanzar la formación de sus productos. La figura 4.7 muestra el transcurso de la reacción de deslignificación con dióxido de cloro para 2 niveles de COD, el menor para una pulpa lavada al infinito y otra con 47 kgCOD/BDt, en tanto que la figura 4.8 permite apreciar lo rápido que se consume este reactivo, ya que en los primeros 15 minutos de reacción la concentración del residual se reduce a 82 mg/L para una pulpa limpia y alcanza sólo los 22 mg/L para una pulpa con el nivel de sobrecarga de licor de la planta.

Figura 4.7(derecha): Efecto del licor negro sobrecargadoen la velocidad de deslignificación con ClO_2 en la etapa D_0.



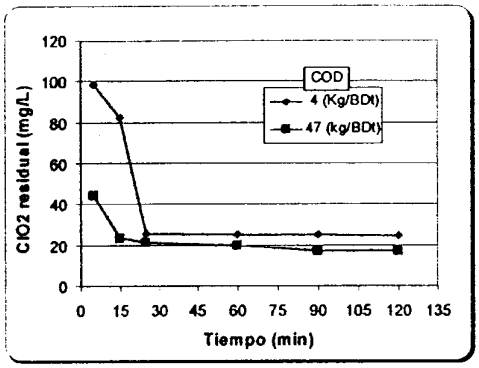
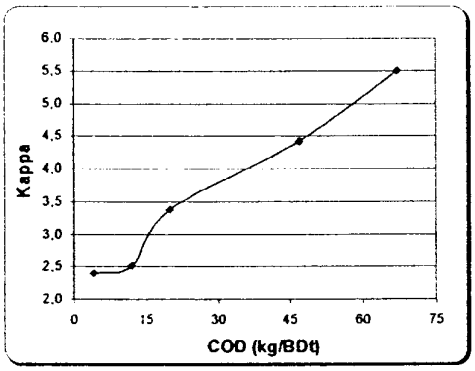


Figura 4.8(izquerda): Efecto del licor negro sobrecargado en la velocidad de consumo de ClO_2 durante la etapa D_0.

4.3.2 Efectos del licor negro sobrecargado en las etapas de extracción y D_1.

La pulpa utilizada en los experimentos, sólo se contaminó en la entrada de la etapa D_0, luego a cada una se le somete a toda la secuencia de blanqueo. La figura 4.9 muestra el efecto del licor sobrecargado sobre el kappa de salida de la extracción. Este índice aumenta, variando la respuesta en 3 unidades para el rango de COD estudiado.

Figura 4.9: Efecto del licor negro sobrecargado en el kappa de salida de la etapa de extracción.

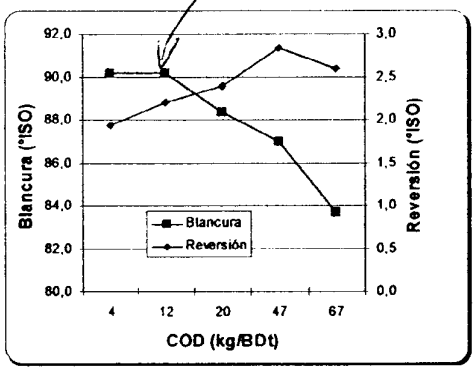


La característica más importante en el producto final es la blancura. Tal como lo muestra la figura 4.10, esta se ve afectada significativamente por el nivel de sobrecarga de licor negro. De esta figura se puede observar que para el nivel de COD de 47 kg/BDt, la carga de dióxido aplicada no entrega una blancura sobre 90°ISO y sólo se obtiene 87°ISO en el producto final.

La viscosidad y reversión final alcanzada por la celulosa no muestra una tendencia clara como respuesta al factor en estudio y tal como lo señalará la sección 4.6, el COD de entrada a blanqueo no afecta significativamente estos parámetros del producto.

Até 15kg/t não afeta

Figura 4.10(derecha): Efecto del licor negro Sobrecargado en la blancura y reversión de la celulosa como producto final.



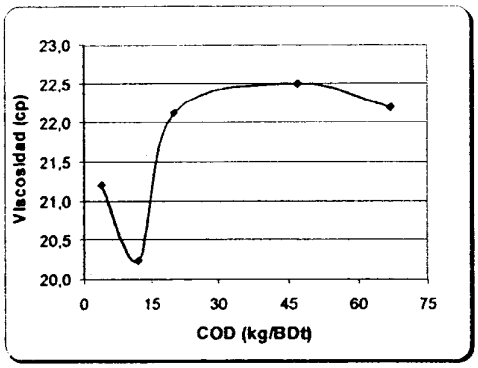


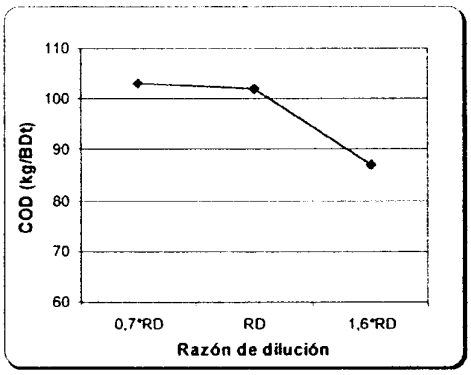
Figura 4.11(izquierda): Efecto del licor negro Sobrecargado sobre la viscosidad de la celulosa.

4.4 Efecto del lavado en la disminución de la sobrecarga de licor negro en la pulpa.

La sobrecarga de licor negro en la pulpa es una respuesta del lavado que se hace de ésta. Se estudió el efecto de la razón de dilución en la disminución del COD en la pulpa, cuyo resultado se aprecia en las figuras 4,12 y 4.13.

Un aumento de un 60% en la razón de dilución actual de la planta, RD, produce una reducción de la sobrecarga de licor en 15 kg/BDt para la pulpa que entra a los reactores de oxígeno. Distinto es el efecto para la pulpa que entra a blanqueo, donde el mismo aumento produce sólo una reducción de 4 kg/BDt.

Figura 4.12(derecha): Efecto de la razón de dilución en el COD de la pulpa que entra deslignificación.



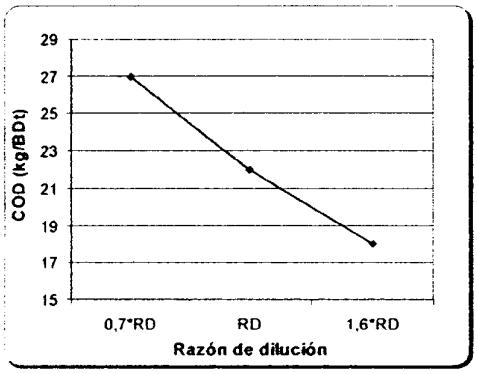


Figura 4.13(izquierda): Efecto de la razón dilución en el COD de la pulpa que entra a blanqueo.

4.7 Planteamiento de un mejoramiento de la configuración de lavado.

4.7.1 Evaluación de la calidad de aguas de lavado.

Al realizar la simulación del proceso de lavado se utilizó las mismas aguas empleadas en los filtros de planta. En ellas se midió la demanda química de oxígeno con el objetivo de conocer su calidad e inferir su efecto en el nivel de licor negro sobrecargado en la pulpa procesada.

Tabla 4.4: Niveles de COD en las aguas de lavado.

Agua de lavado	COD (mg/L)
P-30	35578
P-31	19247
CB-31	11432
P-34	4433
Agua caliente	0
Condensado Sec.	1236

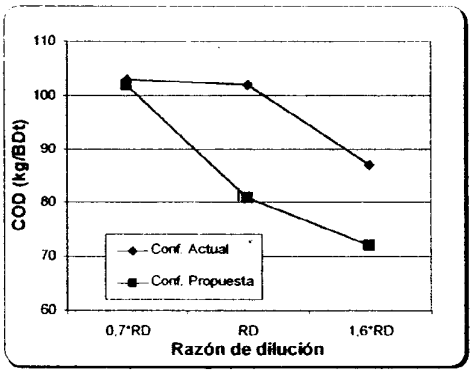
Tal como lo señala la tabla anterior, la demanda química de oxígeno aumenta a medida que los flujos se acercan al digestor, dirección en la cual se van concentrando los filtrados del lavado y en consecuencia la pulpa más sucia es lavada con un flujo cuya concentración en licor es también la más alta. Es posible además, observar el alto COD del agua que diluye y lava la pulpa que entra a los reactores de oxígeno (CB-31), causante del alto nivel de sobrecarga de licor negro.

Debido a la calidad de agua de lavado que anteriormente se ha observado y al poco efecto que existe en el aumento del flujo de la misma sobre la disminución del licor sobrecargado crudo y oxidado, es que se plantea una solución alternativa que se presenta a continuación.

4.7.2 Planteamiento de una nueva configuración de lavado.

La base de esta nueva configuración está basada en los resultados mostrados en la figura 4.16, donde se simuló el lavado de la pulpa que entra a deslignificación utilizando el filtrado del lavado P-34 para bajar la consistencia de la descarga del filtro P-31 y para diluir la pulpa sobre el CB-31.

Figura 4.14: Efecto de la configuración de lavado propuesta en la reducción del licor negro sobrecargado.



Los efectos son visiblemente mejores y estadísticamente significativos, resultando en una reducción del licor sobrecargado, que para la misma razón de dilución de la planta, es de 21 kg de COD/BDt, nivel que no se alcanza en la configuración actual ni aun cuando se aumentara el flujo de agua de lavado en un 60%.

La nueva configuración de lavado propuesta es presentada en la figura 4.15. En ella se determinó que con el cambio introducido en la distribución del flujo de filtrado del presurizado 34, es necesario introducir agua fresca para bajar la consistencia de la pulpa que proviene del reactor de oxígeno.

La característica que presenta esta configuración es que permite concentrar el licor negro en el primer filtro sin hacerlo pasar a deslignificación, o a lo menos, lograr una reducción del licor negro sobrecargado que se estima en 40 kg de COD/BDt a la entrada de los reactores de oxígeno, lo que permite alcanzar un ahorro en oxígeno de 6 kg/BDt y junto con esto, bajar la sobrecarga en blanqueo a 35 kg/BDt reduciendo el consumo de dióxido para la secuencia ECF en alrededor de 2 kg/BDt.

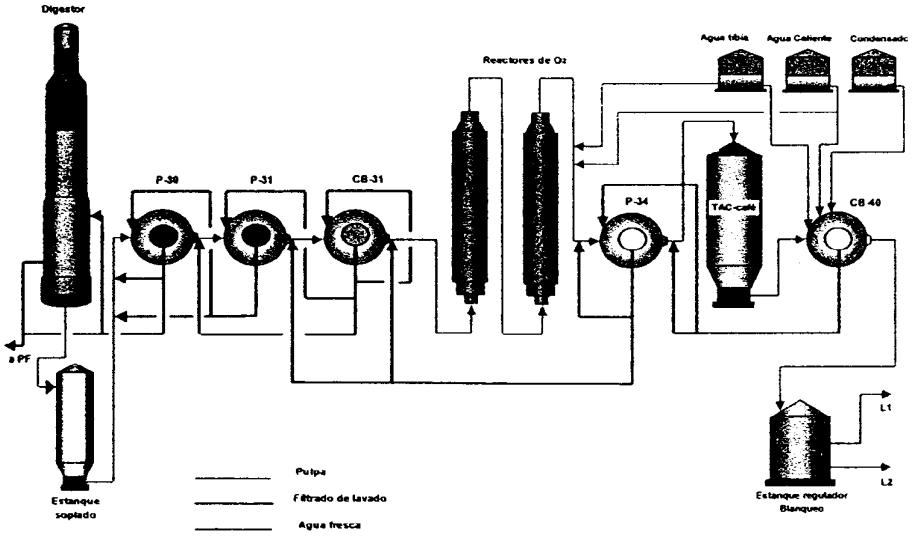
Se estima que el agua fresca utilizada permite bajar la consistencia de la pulpa en la entrada de los filtros P-30 y P-31, lo cual evita la necesidad de enviar un mayor flujo de licor a evaporadores, ya que realizando un buen control del proceso, éste se puede recircular en el filtro P-30.

Por otro lado, en los filtros P-31 y CB-31 se le incorpora agua con menor COD, producto de la inyección de agua fresca en la corriente de entrada al P-34, la que gracias a su mejor calidad, debido a una menor concentración de impurezas, permitiría un desplazamiento del licor negro arrastrado a lo menos como lo señala la figura 4.16.

Se ha considerado el empleo de agua tibia para este objetivo, ya que es la que se encuentra disponible y su calentamiento se puede lograr utilizando el proceso normal y actual de la planta.

Cuando es necesario subir la temperatura del agua caliente por sobre los 75°C, ésta se hace pasar por un intercambiador de calor, donde vapor de baja permite alcanzar los 80°C ó más. Mediante un balance de materia y energía se ha determinado que la configuración propuesta involucra un aumento del flujo normal de agua tibia en 0,2 m^3/s, esto implica que la temperatura a la cual saldría de planta de agua caliente estaría por debajo de los 50°C y se requeriría un flujo de vapor vivo mayor para enviar el flujo de agua caliente a temperatura normal al filtro CB-40, lo cual no resulta económicamente rentable. De esta manera surge la necesidad de hacer una redistribución del agua a diferentes temperaturas con el fin de minimizar el consumo de vapor.

Figura 4.15: Configuración de lavado propuesta.



5. DISCUSIONES

A continuación se presenta un análisis de los resultados obtenidos en las diferentes etapas del estudio.

5.1 Deslignificación

- El aumento del kappa observado en la figura 4.1 permite inferir que la reacción de oxidación por el oxígeno con la lignina, en presencia de licor negro, ya no es igualmente efectiva, ya que para el mismo tiempo de reacción, debido a la naturaleza biradical del oxígeno, esta molécula fácilmente puede atacar, además de la lignina, una gran cantidad de compuestos presentes en el licor negro sobrecargado, los cuales se oxidan. Esto hace que, adicionalmente, se consuma una mayor cantidad de este reactivo si se desea establecer un porcentaje de deslignificación objetivo. Para alcanzar un 41,7% de deslignificación, una pulpa completamente limpia sólo requiere 9,8 kgO_2/BDt en tanto que una con el nivel de COD de la planta necesita alrededor de 23 kgO_2/BDt

- La selectividad de la deslignificación se ve afectada significativamente por el licor negro sobrecargado, esto se debe a que la lignina ya no está siendo degradada en el mismo porcentaje (kappa aumenta) y por otro lado, el grado de polimerización de la celulosa se ve afectado presentando una disminución, que se ve reflejada por una caída de la viscosidad, tal como lo muestra el gráfico 4.1.

  La explicación de la caída de la viscosidad de la pulpa deslignificada, en presencia de una mayor sobrecarga de licor negro, se encuentra en el gráfico 4.3 que muestra un descenso del pH.

  Este parámetro se ve afectado por la generación de compuestos de tipo ácido producto de la reacción entre el oxígeno y el licor negro, a su vez, esto hace que las condiciones óptimas bajo las cuales ocurre el ataque del oxígeno a la lignina se vean alteradas, cambiando desde un medio alcalino, deseado para la deslignificación, a un medio ácido el cual favorece el ataque del oxígeno a la fibra celulósica, reduciendo su resistencia mecánica.

- La deslignificación practicada en planta es en dos etapas, con lo que se podría pensar que la simulación realizada en laboratorio, en una etapa, estaría alejada de la realidad. Sin embargo, los resultados alcanzados al nivel de COD de la planta, presentan una completa correspondencia tanto en el kappa promedio de salida (10,5) como el consumo específico de oxígeno ya que para el mes de junio existe una diferencia de un 10,5% entre laboratorio y planta, lo cual es muy bueno considerando las diferencias de escala.

- El consumo de oxígeno se calculó a partir de la presión final en el reactor y utilizando la ecuación de gas ideal. Este cálculo es válido bajo las suposiciones que todo el espacio vacío en el reactor está ocupado por el oxígeno y que los gases producidos durante la reacción, como el CO_2, son despreciables. Además, debido a que la presión inicial en el reactor es de 5 bar, considerada relativamente baja, el coeficiente de compresibilidad del gas, que bajo estas condiciones resulta en 0,999, dan validez a las suposiciones de idealidad.

5.2 Blanqueo

- En este estudio se ha dado principal interés a la etapa D_0, puesto que es ésta la que recibe el mayor efecto del licor negro sobrecargado, luego éste se ve amortiguado por las reacciones y lavados posteriores. Esto se puede observar en los gráficos 4.5 y 4.10 donde las reducciones de la blancura para el primero, es aproximadamente 9 puntos con respecto a una pulpa limpia, en tanto que en la celulosa producto sólo hay una disminución de 3

para el nivel de COD de la planta.

- Con respecto a la velocidad de deslignificación con ClO_2 se puede señalar que el mayor efecto del COD se aprecia en los primeros 25 minutos de reacción, ya que para un mismo tiempo, los kappa alcanzados para los 2 niveles son estadísticamente distintos, pero luego de este tiempo no presentan variaciones tan significativas.

  Considerando las figuras 4.8 y 4.9 simultáneamente, se puede realizar una interesante deducción. Para una pulpa con 47 kgCOD/BDt el dióxido sigue consumiéndose (residual disminuye), aún cuando el kappa no varía. Esto implica que en los primeros minutos se ve favorecida la reacción de ataque a la lignina, pero luego de los 60 minutos el dióxido de cloro sólo continúa reaccionando con el licor negro lo que hace que se consuma más, sin cumplir el objetivo que se busca de bajar el índice kappa. El comportamiento de la pulpa limpia (4kgCOD/BDt) respalda esta afirmación.

- En planta, luego de la deslignificación con oxígeno, no hay una contaminación posterior de la pulpa que entra a blanqueo, sin embargo el efecto de la presencia de licor negro permanece, esto se observa en los resultados obtenidos para la extracción, mostrando que tampoco hay una deslignificación constante durante esta etapa, el kappa de salida aumenta y el porcentaje de deslignificación disminuye a medida que la sobrecarga es mayor.

- Con respecto al producto final, se observa que una pulpa limpia alcanza la blancura objetivo de 90° ISO, sin embargo una pulpa con el nivel de sobrecarga como el actual de la planta, no lo hace, lo cual puede ser nocivo a la hora de comercializar la celulosa. Por este motivo es aconsejable realizar una revisión de las condiciones de blanqueo, principalmente carga de dióxido de cloro, o bien, por otro lado, disminuir el COD de la pulpa a blanqueo a través de un mejoramiento del lavado.

  Estadísticamente no hay un efecto significativo del licor negro sobrecargado en la reversión ni la viscosidad final de la celulosa, lo cual es beneficioso para el producto, puesto que una caída adicional de estas propiedades podría tener importantes consecuencias en las aplicaciones posteriores a la celulosa.

5.3 Lavado

- En esta simulación se aplican los dos principios de lavado: dilución/extracción y desplazamiento, que son las operaciones que ocurren en un filtro industrial, por lo tanto el error asociado al experimento se debe principalmente a que fueron realizados en forma manual, no obstante, permiten encontrar las tendencias de los efectos. Ejemplo de ello, es que bajo la razón de dilución normal de la planta (RD) aplicada a los filtros de lavado previos a la deslignificación, se alcanza un nivel de COD alrededor del promedio de la planta cercano a 101 kg/BDt, lo cual da validez a la simulación experimental realizada.

  Distinto es el caso de los ensayos realizados para los filtros P-34 y CB-40, donde el COD de respuesta está mucho más bajo que el nivel de la planta. Esto se debe a que el punto de muestreo está a la entrada del P-34 cuando ya a ocurrido la dilución, además el punto de muestreo para la determinación del COD en planta, está justo antes de entrar a la etapa D_0, donde ya ha sido diluida con aguas de blanqueo. Pese a lo anterior, el experimento permite conocer que un aumento de dilución no es significativamente efectivo en la reducción del licor sobrecargado, ya que un aumento de un 60% en la razón de dilución implica un aumento de un 60% en el flujo de agua de lavado, efecto que se mantendría hasta el presurizado 30 diluyendo el licor que, en forma definitiva, se dirige a los evaporadores, sobrepasando la capacidad de esta planta.

5.4 Nueva configuración de lavado.

- Observando los niveles de licor negro sobrecargado en la línea de pulpa a deslignificación y blanqueo, y determinando a su vez el COD de las aguas de lavado de la planta, es que se ha considerado la opción de cambiar la configuración de las aguas de lavado.

  La inconveniencia de no ser posible la simulación experimental completa, debido a que no son aguas de lavado existentes en la actualidad, no permiten una conclusión absoluta al respecto, sin embargo al comparar la reducción del COD provocada al simular parte del cambio propuesto, figura 4.16, este resultado actúa como base del proyecto propuesto. Esta mayor reducción se debe a que es un filtrado que posee menor porcentaje de sólidos y éste permite un mayor desplazamiento del licor arrastrado, además por el aumento de licor negro oxidado en la pulpa que entra a los reactores, el consumo adicional de oxígeno por la presencia del licor seria menor. Se cree que con la configuración propuesta, la reducción de licor arrastrado alcanzaría niveles más bajos que los obtenidos experimentalmente.

  Las condiciones de operación deben ser estudiadas más a fondo, enfocándose en los efectos que tendría sobre la concentración de sólidos en el licor a evaporadores y sobre la temperatura de las aguas de lavado.

  Un punto importante al respecto, es que las utilidades presentadas en los resultados, podrían ser aumentadas en aproximadamente un 150%, por ahorro de vapor, si se aplica integración de calor, subiendo la temperatura del agua tibia mediante una fuente de energía a alta temperatura que se encuentre presente en el proceso.

- La nueva configuración no tiene efectos significativos en las pérdidas de soda, ya que las diferencias bajo las condiciones de dilución actual de la planta, están dentro del error experimental. Sin embargo, es posible pensar que de acuerdo a los antecedentes [17] , por la introducción de agua fresca, el pH tendería a bajar, resultando en un menor arrastre de soda. Esto no fue posible comprobar en los lavados previos a blanqueo, porque el punto de muestreo está ubicado después de la dilución que se propone realizar con agua fresca.

6. CONCLUSIONES

Sobre la base del trabajo realizado se pueden hacer las siguientes conclusiones:

- Al procesar una pulpa que contiene licor negro sobrecargado, se observa que ésta presenta respuestas diferentes a una pulpa completamente limpia, acentuándose los efectos en forma negativa a medida que aumenta el nivel de arrastre de licor.

- El licor negro sobrecargado provoca una caída en la selectividad de la deslignificación con oxígeno, reflejada por un aumento en el índice kappa y disminución de la viscosidad de la pulpa deslignificada. Esta sobrecarga provoca además, un mayor consumo de oxígeno, estimándose que al reducir el COD en 40 kg/BDt se obtiene un ahorro en 6 kg de oxígeno/BDt.

- El ingreso de licor negro sobrecargado, desde la deslignificación a la planta de blanqueo, aumenta el kappa de salida de cada etapa de la secuencia, reduce la blancura alcanzada y eleva el consumo de dióxido de cloro. Consecuencia de esto es que, para el nivel de COD de la planta, se alcanza un producto con una blancura de sólo 87°ISO. Por lo tanto, si se desea lograr una blancura objetivo de 90°ISO, es necesario aumentar la dosificación de dióxido de cloro en la etapa D_0, o bien reducir el nivel de arrastre de licor a la entrada de blanqueo.

- El licor negro sobrecargado no presenta efecto sobre la reversión de blancura ni la viscosidad del producto final.

- El mayor efecto del licor negro arrastrado hacia blanqueo se observa en la etapa D_0, que en

comparación a una pulpa limpia, éste también afecta la velocidad de deslignificación con ClO_2. En los primeros minutos de reacción se favorece el ataque del dióxido a la lignina, sin embargo luego de los 90 minutos sólo existe reacción con el licor negro.

- Bajo la configuración actual de lavado y para los niveles de COD de la planta, no hay un efecto del aumento de la razón de dilución en la reducción del licor negro sobrecargado.

- Para bajar los niveles de licor negro sobrecargado que existen actualmente en la planta, es necesario mejorar la calidad de las aguas de lavado. Se plantea una nueva configuración de lavado que alcanza este objetivo, reduciendo el COD en un 35% a la entrada de la deslignificación y del orden de un 27% para blanqueo, con lo que se ahorra, principalmente, un 26% de oxígeno y un 15% de dióxido de cloro.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Andtbacka, S. "The importance of washing in oxygen delignification and TCF bleaching." Pulp Paper Canada 99(3):T93-96 (1998).

2. Barroca, M., Simoes, R., Castro, J. "Effect of carry-over on kinetics of chlorine dioxide delignification of an unbleached hardwood kraft pulp" Appita Journal 55(1):60 (2001).

3. Chirat, C., Mateo, C., Jeunet, A. And Lachenal, D., "Formation of chromophore from carbohydrates during pulping and their impact on bleaching". Pulp & Paper Canada 103(2):pagina, (2002).

4. Crotogino, R., Poirier, N., Trinh, D. "The principles of pulp washing." Tappi Journal 70(6):95-103 (1987).

5. Gierer, J., "Chemical aspect of kraft pulping. Part 2", Wood Sci. Technol, 20,1-33 (1986).

6. http://www.papelnet.cl/celulosa/proceso_prod.htm

7. Información proporcionada por el Laboratorio de Pulpa de Planta Santa Fe.

8. Jacobson, S., Nguyen, L. "Modelling the effect of fibre properties and operating conditions on diffusion washing of different eucaliypt kraft fibres." Appita Journal 51(3):213-218(1998).

9. Lindstrom, L.,Norden, S., "Efficient post oxygen washing- Crucial for low blach plant emissions", Appita 43(5):373 (1990).

10. McKague, A.B. and Grey, A., "The reaction of syringol with chlorine dioxide". Journal of Wood Chemistry and Technology 16: 249-259 (1996)

11. Melo, R., "Tecnología de la celulosa y el papel." Depto. Ingeniería Química, Universidad de Concepción, (2001).

12. Miller W.J. et al, "Effect of entrained black liquor carryover on medium consistency oxygen delignification",

13. Montgomery, D. And Runger, G., "Probabilidad y Estadísticas aplicadas a la ingeniería" 1ª Edición, McGraw-Hill Interamericana, ; México (2000)

14. Olm, L. Y A., Teder, "The Kinetics of oxigen bleaching", Tappi, 62(12), 43-46 (1979).

15. Parthasarathy, V., "Entrained black liquor solids and viscosity selectivity in oxygen delignification reinforced with hydrogen peroxide" Tappi Journal 75(9): 243-247 (1990).

16. Pascoal, C., Evtuguin, E., Silvestre, A., "Total fractionation and analysis of organic components of industrial Eucalyptus globules kraft black liquor" Appita Journal 52(3):213 (1999).

17. Rosen, A. "Adsorption of sodium ions on kraft pulp fibers during washing." Tappi 58(9):156-161(1975).

18. Tench,L., Harper, S., "Oxigen-bleaching practices and benefits: an overview", Tappi Journal, Nov. (1987).

19. Vuorenvirta, K., Fuhrmann, A., Gullichsen, J. "Effect of black liquor carryover on selectivity of oxygen delignification." Pulp Paper Canada 102(3): T75-77 (2001).

20. Xuan, N., Venkatesh, V., Gratzl, J., McKean, W. "The washing of soda-oxygen pulps." Tappi 61(8):53-56 (1978).