BLANQUEO DE PULPAS DE EUCALIPTO OBTENIDA MEDIANTE PULPAJE EXTENDIDO (*)

Arnoldo Jara C.; José Paz P.,
Universidad de Concepción, Concepción

SUMARIO

El objetivo de este trabajo es determinar la factibilidad técnica de la combinación del pulpaje extendido con la deslignificación por oxígeno utilizando Eucalyptus globulus.

El trabajo consistió en obtener una pulpa extendida con Kappa menor que el normal, pero equivalente en propiedades de resistencia a una pulpa convencional (Kappa = 16). Luego, a esta pulpa extendida de menor contenido de lignina, se le aplicó las mejores condiciones del tratamiento con oxígeno en medio alcalino, para lograr un grado de deslignificación aceptable. La pulpa oxigenada se blanqueó con la secuencia corta C_DE_OD y se comparó con la pulpa convencional blanqueada con la secuencia C_DEDED.

La deslignificación por oxígeno permite disminuir el contenido de lignina de la pulpa extendida en 30-50% sin perjudicar la calidad de la pulpa.

El blanqueo de la pulpa tratada con oxígeno indica que es suficiente una secuencia corta para obtener altos niveles de blancura. Si se compara el blanqueo de secuencia corta con el convencional, quizás lo más importante es que el blanqueo con una secuencia corta logra disminuir el COD y TOCL en 25 y 43%, respectivamente.

(*) Este trabajo se desarrolló como parte del Proyecto PNUD CHI 87/018.

1 Antecedentes

En la producción de pulpa blanca, los licores descargados desde la planta de blanqueo son un serio problema desde el punto de vista ambiental. Una reducción de la cantidad de materia orgánica en los efluentes es deseable, pudiéndose lograr esto a través de una mayor deslignificación de la pulpa antes que entre a blanqueo o bien por tratamiento de los efluentes. Ambos caminos han solucionado en parte el problema, pero debido al desarrollo que ha tenido el proceso kraft, este trabajo se abocó al estudio de los procesos de deslignificación.

Existen tres alternativas que favorecen o extienden la deslignificación:

- Usar aditivos en el licor de cocción, tales como antraquinona y polisulfuros.
- Modificar el proceso de cocción convencional.
- Deslignificar la pulpa al término del proceso de cocción, usando reactivos químicos libres de cloro.

Una de las técnicas más nuevas es la modificación del proceso de cocción conocida por pulpaje extendido. Esta deslignificación se realiza con mayor selectividad que la convencional, permitiendo obtener una pulpa con menor Kappa y con buenas propiedades de resistencia. Este proceso es ventajoso, ya que disminuye, el consumo de reactivos de blanqueo y la carga contaminante de los efluentes de blanqueo.

El proceso actual de cocción kraft no permite aumentar la deslignificación de la pulpa, sin provocar severo daño de ella, por lo tanto, la mejora en el proceso de cocción kraft sólo se logrará a través de una mayor selectividad de las reacciones de deslignificación. Es esencial, para mejorar la selectividad, minimizar el ataque del álcali sobre los carbohidratos para evitar una disminución de las propiedades mecánicas de la pulpa y un menor rendimiento del proceso.

La concentración de los iones OH^- y HS^-, así como otras variables (concentración de lignina disuelta, etc.) determinan la velocidad de deslignificación de diferentes maneras en las distintas fases del pulpaje (inicial, principal y final) (1, 2).

La degradación de los carbohidratos es determinada fuertemente por la concentración del ión OH^- y ocurre en la fase inicial, por lo tanto, la carga de álcali debe ser menor en el comienzo de la cocción (3,4).

Un aumento de la concentración dél ión HS en la fase inicial, no afecta la velocidad de esta fase, pero sí aumenta la velocidad de deslignificación de la fase principal y disminuye la cantidad de lignina residual (5).

La presencia de lignina en el licor de cocción

durante la parte final de la cocción perjudica severamente la selectividad, en tanto que, una alta concentración de lignina disuelta en el comienzo de la cocción no afecta determinantemente (6).

De lo anterior, se tiene que las siguientes condiciones son esenciales para mejorar la selectividad (7,8):

- La concentración de OH (AE) debería ser menor en la fase inicial de la cocción que en una normal y mantenida relativamente uniforme a través de la cocción.
- La concentración de HS^- debe ser lo más alta posible, especialmente durante la fase inicial y principal de la deslignificación.
- EL contenido de lignina disuelta en el licor de cocción debe mantenerse baja, especialmente durante la fase final de la cocción.

Para cumplir estos principios la cocción batch normal se divide en dos etapas, con el desplazamiento de licores entre ellas. El licor de la primera etapa tiene baja carga de álcali y alto contenido de sólidos, y el de la segunda, contiene el resto del álcali y es de bajo contenido de sólidos.

Otra variable importante es el factor H de desplazamiento, ya que este determina la eficiencia con que ocurre la fase final. Un desplazamiento temprano da un período largo a un bajo contenido de lignina, y un desplazamiento tardío da una menor concentración de lignina por un período más corto. La alternativa más favorable debe ser establecida con pruebas experimentales (9).

El proceso de cocción extendida consiste básicamente en dos etapas de cocción consecutivas con licores de distinta composición, donde el límite entre ellas está fijado por el intercambio de licores por desplazamiento.

La primera etapa consta de las fases: carga de astillas, prevaporizado, carga de licor de cocción, y calentamiento hasta la temperatura de cocción. El desplazamiento normalmente se realiza una vez transcurrido cierto tiempo a temperatura de cocción.

La segunda etapa consiste en completar la cocción en forma normal comprendido el soplado y la descarga del digestor.

El licor de la segunda etapa es de bajo contenido de lignina (o sólidos) y está compuesto por licor blanco y licor de lavado. El licor de la primera etapa es de alto contenido de lignina y corresponde a licor blanco y licor negro.

Respecto de la deslignificación con oxígeno, los primeros intentos de usar oxígeno molecular como agente de blanqueo se remontan a mediados de 1950, y desde entonces ha sido motivo de variados estudios. Sin embargo, sólo en 1970 es

promovido el blanqueo con oxígeno por la necesidad de minimizar la polución de los efluentes de blanqueo (10, 11).

Hoy en día, el blanqueo con oxígeno es un proceso comercial para la remoción de la lignina de pulpas kraft. La aplicación de oxígeno requiere condiciones de temperatura, presión y carga de soda altas, para superar los problemas de transporte. El blanqueo con oxígeno es diseñado para un grado de deslignificación entre 30-50% para no dañar las propiedades de la pulpa (12).

Los incentivos que impulsan el uso del oxígeno como reactivo de blanqueo son, la reducción de sustancias contaminantes en reacciones de blanqueo, la reducción del consumo de reactivos de blanqueo y la generación de energía por uso del sistema de recuperación de reactivos. Las desventajas que presenta son, la poca selectividad del oxígeno respecto de la celulosa y el alto costo del equipamiento industrial necesario para su implementación. Por esto último, se recomienda operar a bajas presiones para que el costo del equipo disminuya (13, 14).

A continuación se detallan las condiciones de proceso que se deben tener presentes para la aplicación del blanqueo con oxígeno.

Carga de hidróxido de sodio (NaOH)

La velocidad de deslignificación y la de degradación de carbohidratos aumenta con incremento de la concentración de soda, efecto que se mantiene a lo largo de todo el tratamiento. Ambas velocidades disminuyen hacia el término del tratamiento por consumo de la soda.

La carga de soda es afectada por el nivel de consistencia elegido, puesto que una alta consistencia contribuye a una deficiente distribución del álcali y desfavorece el mecanismo de transporte de los productos de la reacción (15).

La carga de soda debe permitir obtener al término del tratamiento un pH entre 10 y 12. Si el pH es menor, implica que la cantidad de soda cargada es insuficiente para lograr el grado de deslignificación deseado. Si el pH es mayor, existe un exceso de soda que causa una degradación adicional de la pulpa. Para efectos prácticos la carga de soda se puede usar como agente de control de la deslignificación (16).

El rango elegido es de 0,5 a 5% bps, considerando datos de literatura y razones de experimentación.

Temperatura

Al ser el blanqueo con oxígeno un proceso químico, las velocidades de deslignificación y de degradación presentan

dependencia de la temperatura, que puede ser expresada en una ecuación del tipo Arrhenius. Así, un aumento de la temperatura provoca un aumento de ambas velocidades (17).

El rango de temperatura seleccionado es de 60 a 110°C. Temperaturas menores presentan bajas velocidades de reacción y temperaturas mayores provocan un severo daño de la pulpa.

Consistencia

En el comienzo del desarrollo del blanqueo con oxígeno se usó alta consistencia (30%), principalmente por aspectos técnicos, ya que la difusión del oxígeno en la solución alcalina se ve favorecida por la alta consistencia respecto de la baja y media consistencia. Pero, actualmente considerando aspectos económicos, se concluye que el uso de media consistencia (6-15%) es superior (18, 19).

Este estudio se inicia con un rango de consistencia de 8 a 20%, para luego fijarla en 10%.

Tiempo

El tiempo de tratamiento se fijó en 45 minutos, puesto que en el rango de 40 a 70 minutos no se aprecia grandes variaciones, tanto en deslignificación como en degradación. Incluso, de acuerdo a la literatura, tiempos superiores a 2 horas no entrega mayores beneficios. Industrialmente altos tiempos de tratamiento es antieconómico desde el punto de vista de producción (20).

Presión

Al igual que la temperatura y la carga de soda, un aumento en la presión de oxígeno provoca un aumento de las velocidades de deslignificación y de degradación de los carbohidratos (21).

En general, se informan altos niveles de presión de oxígeno, lo cual se traduce en mayores consumos y en un encarecimiento del equipamiento.

En este estudio, la presión se fijó en 50 psi, después de concluir que esta variable es de mediana importancia en el rango de 20-70 psi.

Protector

La necesidad de usar un protector o inhibidor surgió de las primeras aplicaciones en que se adicionó sólo oxígeno y soda, obteniéndose pulpas severamente dañadas. El principal cambio que se aprecia por uso de un protector es el aumento de las propiedades fisicomecánicas de la pulpa (22).

El compuesto mayormente demandado son las sales de magnesio que actúa absorbiendo los iones metálicos de transición. Su dosificación varía entre 0,4 y 0,7%bps.

En nuestro caso, la dosificación de $MgSO_4$ se fija en 0,5 %bps.

2 Diseño y programación

Los objetivos de los ensayos de pulpaje son determinar el factor H de desplazamiento óptimo de la cocción extendida y, obtener una pulpa equivalente en resistencia a una pulpa convencional, pero con menor Kappa.

Nuestro punto de referencia es la cocción normal, por lo tanto, se realizan cocciones para obtener pulpas con distinto grado de deslignificación (o Kappa). Las condiciones usadas son las recomendadas por varios autores que estudiaron el pulpaje kraft en Eucalyptus globulus (23, 24, 25).

Para determinar el factor H o el tiempo de desplazamiento que permite obtener la mejor pulpa extendida, se realizan cocciones completas a igual factor H total, pero con distinto factor H de desplazamiento. La respuesta considerada es la viscosidad intrínseca de la pulpa, pues es un índice directo del daño sufrido por la pulpa.

Los factores H elegidos son 292 y 393, seleccionados a partir de la información disponible, usando pino insigne (26). Se debe recordar que no existe información sobre cocciones batch extendidas de maderas de especies latifoliadas.

A partir de los resultados de las actividades anteriores se obtienen pulpas extendidas con distinto Kappa, variando sólo el factor H de la segunda etapa de la cocción. La carga de álcali se mantiene constante, al igual que la carga de astillas. La temperatura de cocción es la misma que en pulpaje convencional (27). El factor H de la primera etapa se fijó en 292 por presentar mayor viscosidad intrínseca que a factor H de 393.

Las respuestas consideradas en las actividades anteriores son Kappa, viscosidad intrínseca y propiedades fisicomecánicas de las pulpas.

Las variables a fijar para las cocciones convencionales y extendidas son:

- Temperatura de cocción, °C 165
- Tiempo de calentamiento, min 75
- Temperatura inicial, °C 120
- Razón licor/madera 4
- Sulfidez , % bms: 27-29
- Carga de álcali activo , % bms expresado como Na_2O

- convencional 14
- extendido
  - Etapa I 11,54
  - Etapa II 3,26

- Factor H: variable
- Contenido de sólidos del licor negro, % sólidos totales:
  - convencional 19-20
  - extendido
    - Etapa I 19-20
    - Etapa II 10-11

La deslignificación extendida requiere un licor con alto contenido del ión HS^-, es decir, alta sulfidez. Como no existe información sobre los niveles de sulfidez, se supone que deben ser altos si se consideran los valores usados en maderas de coníferas (36-40%) (28, 29). Atendiendo a la disponibilidad de reactivos y a los valores usados en plantas nacionales se usa una sulfidez de 27-29%.

Es sabido que en la deslignificación con oxígeno intervienen siete variables: carga de soda, temperatura, presión de oxígeno, tiempo, carga de protector, consistencia de la pulpa y lavado ácido. Aunque se conocen los efectos que provocan en algunas especies, el conocimiento de esta etapa con pulpa kraft extendida de maderas latifoliadas es poca, y es nula en el género Eucalyptus. Por lo tanto, se ha optado por iniciar el estudio ordenando las variables según su importancia en el proceso.

Para ello, se usó el diseño factorial de Plackett y Burman (30), que consiste en realizar un número de experimentos, en una combinación maestra de los niveles de las variables.

El número de experimentos depende del número de variables a estudiar y cada una de ellas se aplica en dos niveles, bajo y alto.

Los niveles prefijados corresponden a:

Variable	Nivel Bajo (-)	Nivel Alto (+)	Ref.
A. Carga de soda, % bps	0,8	4	39 - 40
B. Temperatura, °C	70	100	39
C. Presión de oxígeno, psi	20	70	39
D. Tiempo, min	40	70	41
E. Consistencia, %	8	20	42 - 20
F. Carga de $MgSO_4$, % bps	0	0,5	40 - 41
G. Lavado ácido, *	No	Sí	25

* Condiciones del lavado ácido:
A pH = 3 agregando H_2SO_4, por 10 a 15 minutos a temperatura ambiente.

Para conocer la influencia de las variables independientes sobre las respuestas consideradas se requiere el empleo de un diseño experimental que permita obtener relaciones empíricas de las variables independientes que satisfagan las respuestas observadas mediante el mínimo de experiencia.

Según Cochran (31), cuando las variables a estudiar son independientes como en este caso, el hecho de utilizar la experimentación factorial permite obtener un cuadro amplio de los efectos de las variables.

Las variables seleccionadas son las que se obtienen del estudio exploratorio, correspondiendo a la carga de soda y a la temperatura. Se mantienen constantes la consistencia, el tiempo, la carga de protector y la presión de oxígeno. El lavado ácido no se aplica por ser de poca importancia en el proceso.

las respuestas a considerar son: Indice Kappa, Viscosidad, Blancura, Longitud de ruptura, Factor de rasgado y Factor de explosión.

Las condiciones óptimas de deslignificación se obtienen después de analizar los modelos matemáticos y los gráficos de las respuestas en función de las variables. Los modelos matemáticos se obtienen del ajuste de los puntos experimentales realizado con un programa de computación. Para una buena elección de las condiciones es necesario usar el concepto de selectividad, pues es el factor más importante en el proceso de deslignificación con oxígeno.

Para concluir el estudio iniciado con el pulpaje extendido, se aplican estas condiciones a una pulpa kraft extendida de Kappa 14,2 (superior en 1 unidad de Kappa a la pulpa usada en las actividades anteriores), que luego será blanqueada con una secuencia corta.

La experimentación de blanqueo consistió en aplicar la secuencia C_DEDED a la pulpa convencional de Kappa 16,2, y blanquear la pulpa oxigenada de Kappa 9,7 con la secuencia corta C_DE_OD.

Las dosificaciones de los agentes blanqueadores se fijó en función del Kappa de entrada para obtener una blancura final entre 88-90% Elrepho.

A las pulpas blanqueadas se les determinó viscosidad, blancura y propiedades fisicomecánicas (a 9000 rev. en PFI).

Con respecto a los parámetros ambientales, se almacenó las soluciones de los licores agotados de cada etapa. Se mezcló los licores de las etapas ácidas con las alcalinas en

iguales proporciones, y luego a la mezcla se le determinó color y la demanda química de oxígeno (COD). También se estima la cantidad de cloro orgánico total (TOCl) que contiene los efluentes de blanqueo con una relación que ha sido aceptada por un gran número de investigadores (32, 33) por entregar buenos valores.

El equipo usado en las cocciones convencionales y extendidas fue el digestor Ellet de 50 litros ubicado en el laboratorio de Control de Procesos de Celulosa Arauco.

La madera de Eucalyptus globulus proviene del Fundo Escuadrón (camino a Coronel); es de 10 años de edad con densidad básica de 544,5 kg/m³.

En el pulpaje extendido existe una distribución de la carga de álcali entre las dos etapas de cocción. Por no existir información sobre el factor de distribución en maderas latifoliadas, se usó el factor determinado para maderas de coníferas, esto es, de 78% para la primera etapa y de 22% para la segunda.

Los ensayos de oxigenación se efectuaron en un reactor estático de 4 litros de capacidad, con calentamiento indirecto.

Las condiciones de operación que a continuación se presentan son el resultado final de este estudio y permiten obtener una deslignificación de 30-35%:

- Consistencia 10%
- Presión de oxígeno 50 psi (3,45 bares)
- Tiempo 45 min
- Carga de $MgSO_2$ 0,5% bps
- Temperatura 90-92°C
- Carga de soda 1,9-2% bps

3 Resultados y Discusión

Es importante determinar si la selectividad mejora con el pulpaje extendido. Los índices más directos del grado de selectividad son la viscosidad y el Kappa de la pulpa. La Tabla 1 y el Gráfico 1 muestran estos índices obtenidos de la experimentación realizada.

En el gráfico se observa que las rectas son casi paralelas en el rango de estudio, es decir, que el proceso extendido logra mejorar la selectividad del proceso convencional en todo el rango en que fue aplicado. Luego, el proceso extendido presenta mayor viscosidad de la pulpa que el convencional a un Kappa dado, lo cual permite obtener una pulpa de menor Kappa y con propiedades similares a la convencional. Cabe recordar, que la características principal del pulpaje extendido es el aumento de viscosidad para un mismo grado de deslignificación.

TABLA 1
SELECTIVIDAD DE COCCIONES CONVENCIONALES Y EXTENDIDAS

Proceso			
Convencional		Extendido	
Kappa	Visc. Intr.	Kappa	Visc. Intr.
14,2	1351	12,6	1321
16,2	1455	13,2	1451
17,2	1541	14,2	1465

Viscosidad intrínseca en dm^3/kg.

El Gráfico 1 muestra que una pulpa convencional de Kappa 16 presenta una viscosidad intrínseca de 1465 dm^3/kg, el mismo valor que tiene una pulpa extendida de Kappa 13,8, por lo tanto, tomando en cuenta viscosidad, el pulpaje extendido logra reducir el Kappa en 2,2 puntos, reducción que aumenta a 3 en niveles de mayor Kappa. También se observa que la ganancia en viscosidad es de 130-170 dm^3/kg para un mismo Kappa.

La leve disminución del Kappa obtenida con la nueva técnica, se debe principalmente a la alta razón viscosidad/Kappa (corresponde a la pendiente de las rectas) que presenta el Eucalyptus globulus, lo cual no permite una brecha más ancha entre ambos procesos. La alta pendiente de las rectas indica que la viscosidad o que los carbohidratos del Eucalyptus son más sensibles al proceso kraft que los de otras especies, aun cuando el tratamiento es menos severo.

En la literatura existe un solo informe de pulpaje extendido en maderas latifoliadas. Se trata de pulpaje extendido de abedul en digestor continuo, y los niveles de temperatura, carga de álcali y Kappa son similares (37). La reducción que se alcanza es de 4-5 puntos en Kappa, se debe a la baja razón viscosidad/Kappa. Lo mismo ocurre con el pino insigne donde se puede reducir el kappa en 5 unidades (34).

Por otro lado, si comparamos la reducción relativa del Kappa del Eucalyptus globulus con el de las otras especies, vemos que son similares y la reducción en 2-3 puntos de Kappa ya no es tan leve como pensábamos.

El rendimiento obtenido se muestra en la Tabla 2.

De la Figura 2 se aprecia claramente que el nuevo proceso entrega mayores rendimientos que el convencional. Para una pulpa de Kappa 16 el aumento de rendimiento es de 0,66%, y para una pulpa de Kappa 13,8 es de 0,2%. La ganancia de rendimiento está de acuerdo a los aumentos conseguidos por este mismo proceso en maderas de coníferas (34).

TABLA 2
RENDIMIENTO VS. INDICE KAPPA
(Rendimiento en kg secos de pulpa*100/kg secos de madera)

Proceso			
Convencional		Extendido	
Kappa	Rendimiento	Kappa	Rendimiento
14,2	54,26	12,6	53,32
16,2	55,24	14,2	54,55
17,2	55,8	-	-

Rendimiento es rendimiento clasificado.
Esta Tabla se ilustra en la Figura 2.

En el Gráfico 2 se observa que el rendimiento de los procesos convergen a un Kappa de 13, lo que indica que a ese nivel de deslignificación no existe diferencia entre ambos procesos, es decir, el beneficio que se logra con la nueva técnica es nulo. Para llegar a ese nivel de deslignificación la pulpa debe estar por largo tiempo expuesta a altas temperaturas, lo que causa una gran disolución de hemicelulosas y hace disminuir los beneficios del pulpaje extendido.

El cruce de curvas que muestra el Gráfico, es atribuible al error que tiene la medición del rendimiento, ya que éste se determinó en forma indirecta, usando el cálculo de humedad de una pequeña muestra. Una forma exacta de determinar el rendimiento es por pesada de toda la pulpa secada en estufa. pero en general no se hace y es la razón de por qué en la literatura es difícil encontrar datos de rendimiento de cocciones.

La comparación de las propiedades físico-mecánicas de las pulpas extendida y convencional, de igual viscosidad y distinto Kappa, demuestra que son similares.

TABLA 3
PROPIEDADES FISICO-MECANICAS

Pulpa	Kappa	Visc.Intr.	L.Ruptura	F.Rasgado	F.Explosión
PC	16,2	1455	10,4	115,9	75,2
PE	14,2	1465	10,1	111,1	72,3

Viscosidad intrínseca en dm^3/kg
Longitud de ruptura en km.

La disminución en el Kappa permitirá reducir el consumo de reactivos de blanqueo y por ende una reducción de la toxicidad de los efluentes.

El estudio inicial de los efectos de las variables

que intervienen en el blanqueo con oxígeno arroja el siguiente orden de importancia:

- Carga de soda y temperatura.
- Consistencia y cargas de protector.
- Presión de oxígeno.
- Tiempo y lavado ácido.

Considerando la deslignificación y la degradación de carbohidratos, cuantificadas a través del Indice Kappa y la viscosidad, respectivamente, se tiene que las variables más importantes en el proceso de blanqueo con oxígeno son la carga de soda y la temperatura.

Los modelos matemáticos que correlacionan las variables más importantes de la deslignificación con oxígeno y las respuestas I.Kappa, Viscosidad, Longitud de ruptura, Factor de rasgado, Factor de explosión y Blancura se detallan a continuación, en función de las variables reales.

OH simboliza % NaOH b.p.s.
T simboliza temperatura °C.

Indice Kappa:

$$NK=7.89459+0.09176OH+0.12699T+0.04185OH^2-0.001122T^2-0.0073755OH*T$$

Viscosidad:

$$V=70.04558+8.589OH+0.33022T-0.64967OH^2-0.0041189T^2-0.1620OH*T$$

Longitud de ruptura:

$$LR=6.5371+1.3052OH+0.09164T-0.23425OH^2-0.00085T^2-0.000530H*T$$

Factor de rasgado:

$$FR=81.6225+7.2243OH+0.664T-0.47048OH^2-0.003529T^2-0.09188OH*T$$

Factor de explosión:

$$FE=26.7+15.02111OH+1.18385T-2.45034OH^2-0.009075T^2-0.0167OH*T$$

Blancura:

$$B=70.8428-0.68212OH-0.9154T-0.32721OH^2+0.006754T^2+0.0501OH*T$$

De los modelos matemáticos presentados se encuentra que, en la mayoría de las respuestas, salvo la blancura, el efecto de las variables carga de soda y temperatura, es negativo. Esto se explica a partir del efecto positivo que presentan las variables sobre las velocidades de deslignificación y de degradación (35, 36), es decir, un incremento de ambas velocidades haciendo disminuir el Kappa, la viscosidad y las propiedades fisicomecánicas. Lo anterior también explica lo positivo del efecto de ambas variables en la blancura de la pulpa, pues ésta se consigue por la degradación de la lignina (27).

El orden de importancia de las variables en todas las respuestas, excepto el rasgado en que el orden es inverso, es

primero la temperatura y luego la carga de soda. Esto es, si se desea aumentar el grado de deslignificación de una pulpa, se debe aumentar la temperatura suavemente, en cambio, la carga de soda debe ser aumentada en forma considerable para obtener el mismo resultado.

Teniendo presente todas las condiciones necesarias para obtener la máxima selectividad y ayudado por un programa de computación que proporciona todas las posibles combinaciones de las variables para obtener un grado de deslignificación dado, se presentan las siguientes condiciones para un 30-35% de deslignificación.

Temperatura 90-92°C
Carga de soda 1,9-2% NaOH b.p.s.

Se descartan las altas temperaturas (T>100°C) por consideraciones económicas y de literatura.

Las temperaturas menores que 90°C también se descartan por provocar drástica caída de la viscosidad y por requerir altas dosificaciones de soda.

Las condiciones seleccionadas son aplicables no sólo a esta pulpa en particular, sino a otras pulpas kraft extendidas con Kappa similar, es decir, a pulpas que tengan un Kappa entre 12 y 16 aproximadamente. El rango de Kappa en que se puede aplicar estas condiciones debe ser de poca amplitud, pues el proceso de blanqueo con oxígeno presenta influencia con el contenido de lignina inicial de la pulpa (38).

La comprobación de estas condiciones se realizó en una pulpa kraft extendida de Kappa 14,2, resultando una pulpa oxigenada con un grado de deslignificación de 31% y con una disminución de viscosidad de 35%, lo cual está dentro de lo predicho por los modelos.

En el proceso de blanqueo es muy importante, además de la blancura que se alcanza, la selectividad del proceso. En Tabla 4 se presenta un resumen de los resultados de los procesos convencional y extendido.

Considerando las pulpas crudas, se observa que la obtenida mediante pulpaje extendido presenta mayor blancura que la pulpa convencional. Esto se explica, por el menor contenido de lignina que posee la pulpa extendida, puesto que la blancura se consigue por mayor deslignificación de la pulpa.

Ahora, si se comparan las blancuras de las pulpas blancas, la blancura alcanzada por la pulpa convencional es mayor que la blancura de la pulpa extendida, pero pueden llegar a ser iguales si las etapas de la secuencia corta fueran optimizadas.

TABLA 4
BLANCURA Y SELECTIVIDAD

Tipo de pulpa	C_DEDED Conv.	C_DE_OD Ext.
Pulpas crudas		
Kappa	16,2	14,2
Visc. Intr.	1455	1465
Blancura	34,97	38,48
Pulpa oxigenada		
Kappa	-	9,7
Visc. Intr.	-	1322
Blancura	-	47,16
Pulpas blancas		
Visc. Intr.	1237	1090
Blancura	88,71	85,38

Visc. Intr. en dm^3/kg; Blancura en % Elrepho

En relación a la viscosidad intrínseca final de las pulpas, se observa que la pulpa extendida presenta menor viscosidad que la convencional. Esta caída en la viscosidad de la pulpa extendida se debe principalmente al tratamiento con oxígeno, pues la caída producida por blanqueo en ambos procesos es la misma.

Las propiedades físico-mecánicas de las pulpas se presentan, comparativamente en la Tabla 5, siguiente:

TABLA 5
RESUMEN DE PROPIEDADES FISICO-MECANICAS
(Refinación a 9000 rev. PFI)

Tipo de pulpa	Longitud Ruptura, km Conv.	Ext.	Factores Rasgado Conv.	Ext.	Explosión Conv.	Ext.
Pulpa cruda	10,4	10,1	115,9	111,1	75,2	72,3
Pulpas blancas						
C_DEDED	9,2	-	112,3	-	67,0	-
C_DE_OD	-	9,2	-	105,8	-	64,3

La variación porcentual de las propiedades físico-mecánicas entre las pulpas blancas de ambos procesos on 0, 6 y 4% para la ruptura, rasgado y explosión, respectivamente. Esto quiere decir que la pulpa obtenida por el nuevo proceso no sufrió severo daño.

Considerando las características finales de la pulpa, se tiene que la combinación de los nuevos procesos es técnicamente factible de aplicar a Eucalyptus globulus puesto que se obtiene una pulpa blanca con buenas características de resistencia.

Si se compara el COD y el TOCl de ambos procesos, el proceso de secuencia corta presenta una disminución de 25 y 43%, respectivamente. La disminución de estos parámetros es una consecuencia del menor consumo de reactivos químicos de blanqueo, principalmente de compuestos clorados. (Tabla 6).

TABLA 6
PARAMETROS AMBIENTALES

Parámetro	C_DEDED Conv.	C_DE_OD Ext.
COD, kgO_2, tps	28,1	21,1
TOCl, kgCl/tps	2,56	1,47
Color, No.	50	50

4 Conclusiones

Pulpaje.

A partir de las modificaciones hechas al proceso kraft convencional se puede decir que:

- La pulpa extendida presenta mayor viscosidad y rendimiento que una pulpa convencional a igual Kappa.
- El pulpaje extendido logra disminuir el Kappa de una pulpa de Eucalyptus globulus en 2-3 puntos, conservando su resistencia.
- El pulpaje extendido ayuda a disminuir los costos de blanqueo y a reducir el impacto de sus efluentes.
- El factor H de desplazamiento óptimo del pulpaje extendido es de 292.

Se concluye que el pulpaje extendido es técnicamente factible de aplicar a Eucalyptus globulus al permitir disminuir el contenido de lignina de la pulpa y mantener su resistencia. También disminuye la polución de los efluentes de blanqueo.

Oxígeno.

El estudio de la deslignificación con oxígeno permite concluir que:

- Las variables que comandan el proceso con oxígeno en medio

alcalino son la carga de soda y la temperatura.
- De mediana importancia en el proceso son la presión de oxígeno, la consistencia y la carga de protector.
- El tiempo y el lavado ácido son de poca incidencia en el proceso.
- La carga de soda y la temperatura actúan negativamente en todas las respuestas, Kappa, viscosidad y propiedades de resistencia, excepto la blancura de la pulpa donde ambos efectos son positivos.
- El tratamiento con oxígeno permite deslignificar una pulpa extendida de Eucalyptus globulus en 30-40% sin perjuficar la calidad de la pulpa.

Se concluye que el blanqueo con oxígeno es una excelente alternativa para extender la deslignificación de una pulpa kraft extendida de Eucalyptus globulus.

Blanqueo.
- Es suficiente una secuencia corta para obtener altos niveles de blancura de una pulpa obtenida mediante pulpaje extendido y deslignificada con oxígeno.
- Considerando las secuencias de blanqueo, el consumo de cloro disminuye en 25% y el dióxido de cloro lo hace en 43%.
- Los efluentes de la secuencia corta presentan menores COD y TOCl que los de la secuencia convencional.

Bibliografía

1. Teder, A.; Olm, L. Paperi Ja Puu, 634a, 315-316 (1981).
2. Bugajer, S.; Assumpcao, R.M. ABCP Congreso Anual 19th (Sao Paulo), 129-142 (1986).
3. Sjoblom, K.; Mjoberg, J.; Hartler, N. Paperi Ja Puu, 4, 227-240 (1983).
4. Sjoblom, K.; Hartler; Mjoberg, J. Tappi J., 66(9), 97-102 (1983).
5. Teder, A.; Olm, L., obra citada (ref. 1).
6. Sjoblom, K.; Mjoberg, J.; Hartler, N. Paperi Ja Puu, 5, 452-460 (1988).
7. Teder, A.; Olm, L., obra citada, 321 (ref. 1).
8. Sjoblom, K., obra citada, part 1, 239 (ref. 3).
9. Sjoblom, K., obra citada, 98-99 (ref. 4).
10. Sjöström, E. Paperi Ja Puu, No.6-7, 439-442 (1981).
11. Sing, R. P. "The bleaching of pulp", 3th Ed., 160-165 (1979).
12. Idner, K. Tappi J., Febrero, 48 (1988).
13. Sing, R.P., obra citada (ref. 11).
14. Solís, A. "Blanqueo libre de cloro de una pulpa kraft". Tesis de Grado, Universidad de Guadalajara, 3-23, México (1987).
15. Solís, A., obra citada (ref. 14).
16. Sing, R.P., obra citada (ref. 11).
17. Teder, A.; Olm, L., obra citada (ref. 1).
18. Hsu, S.L.; Hsiem, J.J. Tappi J., 68 (11), 126 (1985).
19. Nasman, L.; Annergren, G. Tappi J. 63(4), 105 (1980).

20. Teder, A.; Olm, L. Tappi J. 62 (12), 44-45 (1979).
21. Sing, R.P., obra citada (ref. 11).
22. Sing, R.P., obra citada (ref. 11).
23. Bugajer, S., obra citada (ref. 2).
24. Orellana, C. "Optimización económica del proceso de obtención de pulpa kraft blanqueada a partir de E.globulu", Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción (1985).
25. Paz, J.; Reitze, E. "Obtención de celulosa a partir de madera de Eucalyptus globulus de Chile", Lab. de Productos Forestales, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción (1974).
26. Gallardo, T. "Deslignificación extendida en un digestor discontinuo mediante el proceso kraft modificado", Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción (1988).
27. Kortelainen, K.; Backlund, E. Tappi J., 68(11), 70-74 (1985).
28. Sjoblom, K., obra citada (ref. 4).
29. Nordén, S.; Teder, A. Tappi J., 62(7), 49-51 (1979).
30. Plackett, R.L.; Burman, J.P. "Diseños experimentales multifactoriales", Biometrika, 33, 305-325 (1946).
31. Cochran, W.C.; Cox, G.M. "Diseños experimentales", Ed. Trillas, Cap. 8, México (1983).
32. Johansson, B.; Mjoberg, J. Svensk Papperstidning, 10, 30-35 (1984).
33. Sjoblom, K. "Curso de pulpaje y blanqueo", AGA, Concepción, Agosto (1988).
34. Gallardo, T., obra citada (ref. 26).
35. Olm, L.; Teder, A. Tappi, 62(12), 44-45 (1979).
36. Olm, L., obra citada (ref. 11).
37. Sing, R.P., obra citada (ref. 11).
38. Sing, R.P., obra citada (ref. 11).

Gráfico 1

Selectividad de pulpaje

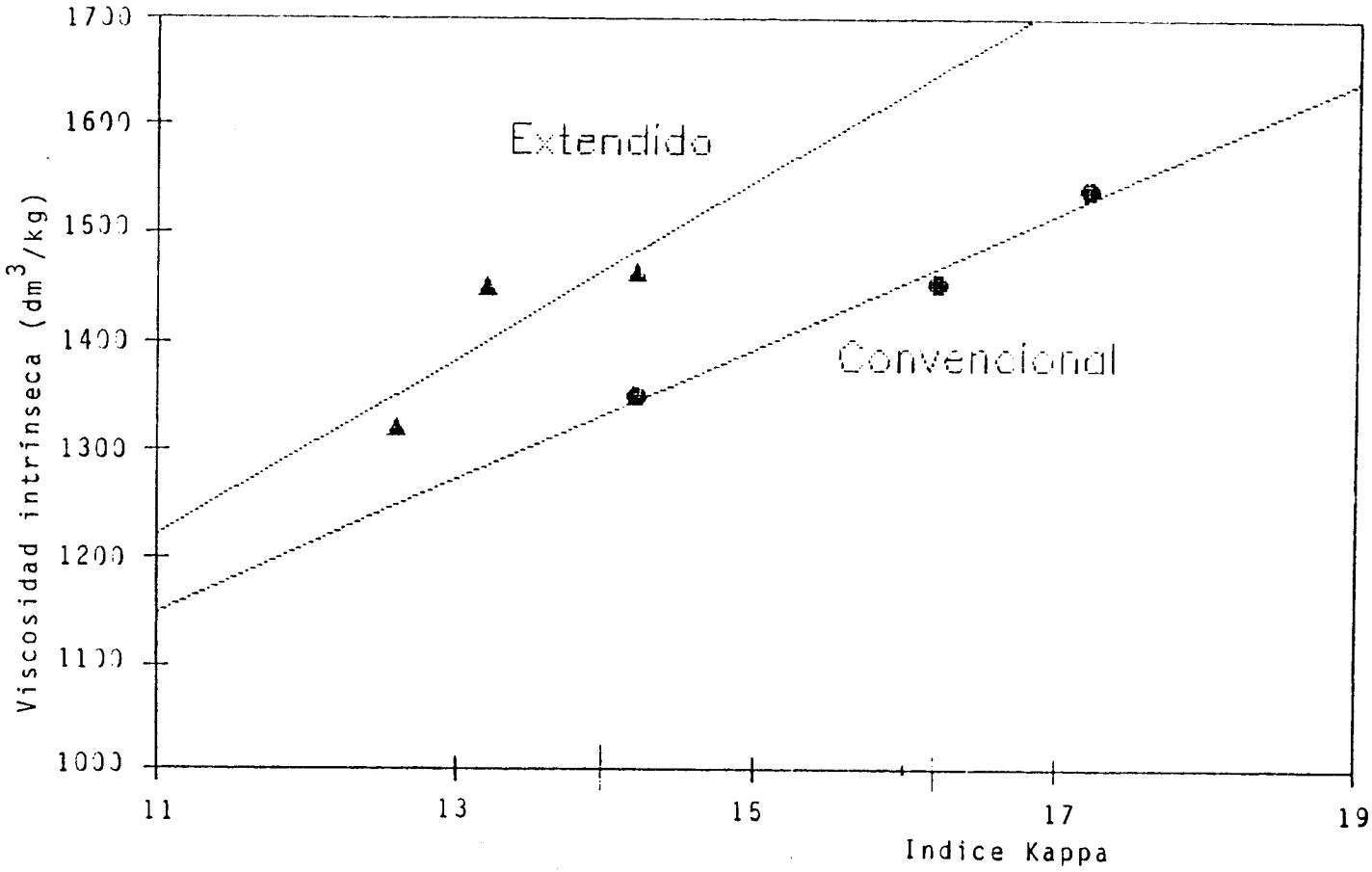
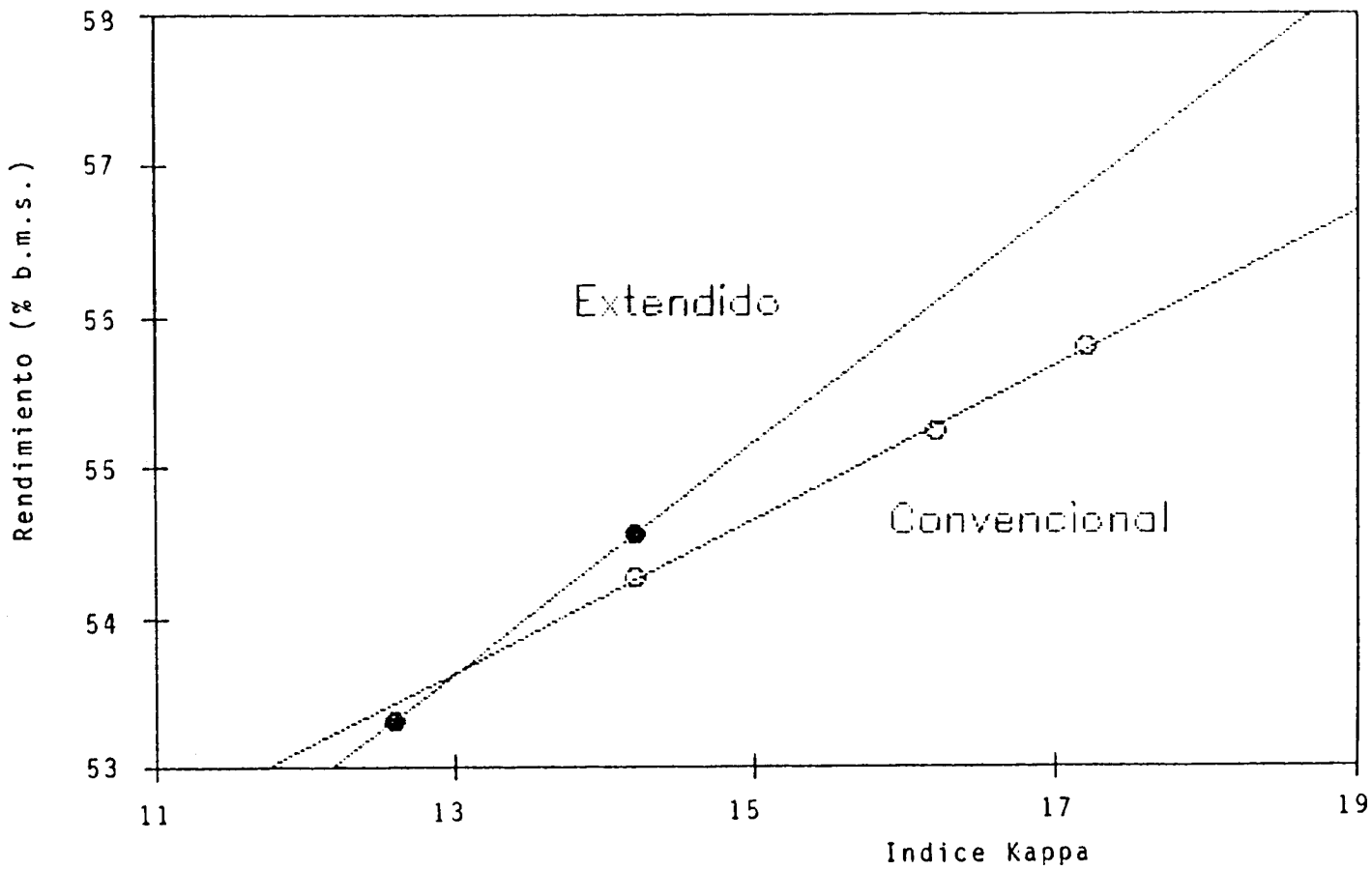


Gráfico 2

Rendimiento vs Indice Kappa