

## CONSUMO DE ENERGIA EN REFINACION

=====

**Jorge Reyes Olate; Roberto Melo Sanhueza.**  
Laboratorio de Productos Forestales-Facultad de Ingeniería  
Universidad de Concepción-Chile

### 1.- RESUMEN

=====

En esta investigación se intentó determinar las causas que provocan un alto consumo de energía en el proceso de refinación de la celulosa chilena blanca de exportación en comparación a celulosas extranjeras de fibra larga.

Para ello se consideraron variables de interés en la estructura física de la fibra (espesor de pared), en la estructura química (hemicelulosas) y el proceso de secado.

El efecto del espesor de pared se determinó refinando pulpas de maderas de raleo y de deshechos de aserreo. Se realizaron pulpajes con prehidrólisis para refinar pulpas con diferentes cantidades de hemicelulosas y se procedió a secar pulpas a diferentes grados haciendo variar la temperatura del sólido final.

Además, a dos muestras de celulosas extranjeras se les analizó el coarseness (como medida de espesor de pared) y se construyeron curvas de refinación midiendo el consumo de energía eléctrica.

Finalmente se efectuaron algunas pruebas con un aditivo que actúa influyendo en la absorción de agua en la fibra.

Fruto del trabajo se confirmó que nuestra celulosa consume más energía al refinarlas. Se logró concluir que el proceso de secado es el principal causante, ya que al realizar pruebas hasta alcanzar diferentes temperaturas de sólido y luego refinarlas se observó su fuerte influencia.

Las hemicelulosas, a pesar de su importancia en la refinación no justifican el alto consumo de energía de la celulosa chilena.

El espesor de pared y la lignina, definitivamente no son importantes en la refinación.

Se vislumbra la posibilidad de emplear aditivos para disminuir el consumo de energía, buscando las dosis adecuadas para tal efecto y que no afecten a las propiedades físico-mecánicas.

Se recomienda realizar estudios acabados sobre la influencia del proceso de secado en la refinación, tratando de obtener curvas de secado que protejan a la fibra.

## 2.- INTRODUCCION

=====

La refinación es de vital importancia en las fábricas papeleras, ya que para obtener un determinado papel, la pasta deberá procesarse hasta un grado apropiado para conseguir las características buscadas en el papel. Por lo tanto dependiendo del tipo de papel, el proceso de refinación consume de un 20 a un 70% de la energía eléctrica empleada en su fabricación y que representa en ciertos casos, aproximadamente un 10% de la energía total consumida en la fábrica (1).

El origen de esta investigación se remonta a inquietudes planteadas en diferentes investigaciones por la empresa nacional exportadora de celulosa blanca. Sus clientes les han presentado el problema que existe en una apreciable diferencia en el consumo de energía eléctrica al refinar celulosa chilena en relación a la de otras plantas.

El estudio no se ha enfocado a un análisis termodinámico del proceso, ni de mejoras en el diseño mecánico de los refinadores, sino que está orientado a determinar el porqué nuestra celulosa consume demasiada energía, eligiendo algunas variables que inciden en el proceso, parcializándolas en relación a su estructura química, física y proceso de preparación de celulosa. En la refinación, la presencia de agua es importantísima. Al entrar en la fibra produce dos efectos fundamentales: hinchamiento y plasticidad. El agua que moja superficialmente o entra en los intersticios intrafibrilares permanece retenida por enlaces tipo puente de hidrógeno. Esto provoca una apertura entre capas vecinas y una consecuencia flexible de la estructura. También se debe destacar que la entrada de agua es una consecuencia del arrancamiento de las fuertemente designificadas capas externas de las fibras (P y S1) y es entonces cuando ocurre la fijación mediante enlaces puente de hidrógeno a la fracción amorfa de la celulosa (40-30%) y principalmente a las hemicelulosas; puesto que éstas fijan agua y sufren el fenómeno de inchamiento con más facilidad que la celulosa (2).

### FACTORES QUE INFLUYEN EN LA REFINACION

De las muchas variables, limitaremos el estudio a tres:

- Espesor de pared
- Presencia de hemicelulosas
- Efecto del proceso de secado en la celulosa comercial

### Efecto del espesor de pared

No está bien definido este efecto, pero algo podría afectar, ya que el golpeteo constante en la refinación tiene su mayor efecto en la pared y si ésta tiene un mayor espesor debería ser más difícil de refinar.

### Efecto de las hemicelulosas

Las hemicelulosas son un grupo de hidratos de carbono de bajo peso molecular. Estas tienden a organizarse en dos maneras, una es en cadenas ramificadas que generalmente se encuentran en estado amorfo y la otra en cadenas lineales o poco ramificadas que están en forma cristalina.

La celulosa, por su estructura cristalina no es accesible al agua, por lo que las pulpas de alto contenido en alfacelulosa son difíciles de refinar. Las hemicelulosas, en cambio, debido a la fracción con estructura amorfa y a la presencia de grupos oxidrilos en la molécula presentan carácter hidrofílico, por lo que absorben agua, se hinchan y adquieren características plásticas. Esto hace que las fibras y fibrilas soporten mejor la acción mecánica, produciendo desfibración en lugar de corte (3).

### Efecto del secado

En la refinación se busca flexibilidad en la fibra. Cuando una pulpa se seca, el agua absorbida se elimina causando la contracción de la fibra que se torna rígida y menos flexible. Este efecto será más o menos drástico según sean las condiciones de secado (4).

Teóricamente, tenemos un mecanismo de remoción de agua que consiste en tres etapas de velocidades de secado (5):

- 1.- Calentamiento
- 2.- Velocidad constante
- 3.- Velocidad decreciente

Durante las dos primeras etapas el agua se evapora como un plano (evaporación de agua libre). A medida que el secado continúa, éste plano retrocede introduciéndose dentro de la fibra y las fuerzas de tensión superficial hacen colapsar tanto a la fibra como a la estructura de la hoja. Si el secado es drástico, ocurren rompimientos de uniones mecánicas muy fuertes y algunas uniones químicas débiles (aquí se remueve el agua ligada).

## PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

### 1° etapa: Influencia del espesor de pared

Para apreciar este efecto se realizaron cocciones kraft convencionales de dos tipos de madera, que marcan bien esta diferencia. Se utilizó una madera de raleo (alrededor de 10 años) y una de deshecho de aserreo (aproximadamente 25 años). Realizado el pulpaje se procedió a refinar en el PFI hasta 9000 rev anotando el consumo de energía y midiendo el drenaje. A las celulosas extranjeras se les midió el coarseness, como una medida del espesor de pared.

### 2° etapa: Efecto de las hemicelulosas

Se efectuaron pulpajes con diferentes niveles de prehidrólisis. Esto tiene como objeto eliminar carbohidratos de bajo peso molecular y preferentemente hemicelulosas. Teniendo una madera típica de procesos industriales se realizaron cocciones kraft con 0, 30 y 60 min de prehidrólisis y alcanzando en el pulpaje un mismo kappa (alrededor de 30). Luego se refinó hasta 9000 rev.

### 3° etapa: Efecto del secado

Las pruebas consistieron en secar hasta una humedad de alrededor de 10%, considerando tres muestras:

- Una se secó alcanzando una temperatura de la fibra de 50°C.
- Otra hasta obtener una temperatura de 65°C.
- Y una última con una temperatura de sólido de 80°C.

Todas ellas se refinaron hasta 9000 rev.

### Efecto de la presencia de aditivos

Con un aditivo hidratante de la fibra se hicieron pruebas a celulosa blanca de exportación con diferentes dosis (desde 100 hasta 1000 g/ton). Se refinó hasta 9000 rev y se comparó con una celulosa refinada sin aditivo. Cuando se detectaron aumentos en el °SR y/o en el tiempo de drenaje, a estas celulosas se les fabricaron hojas y se le midieron propiedades físico-mecánicas según normas Tappi.

Además se preparó una muestra con 222 g/ton y se secó hasta alcanzar una temperatura de sólido de 50°C.

### 3.- RESULTADOS

TABLA 3.1

Refinación de celulosa extranjera E-1

REV.	°SR	T.DRENAJE s	ENERGIA KWh/kg
0	13.0	7.8	-
3000	16.0	15.5	1.39
6200	22.5	41.2	2.75
8200	29.0	52.0	3.64
9000	36.0	93.0	3.78

TABLA 3.2

Refinación de celulosa extranjera E-2

REV.	°SR	T.DRENAJE s	ENERGIA KWh/kg
0	11.5	7.2	-
3000	15.5	15.0	1.29
6200	25.5	47.0	2.74
7200	33.5	78.6	3.61
9000	40.0	95.4	3.91
12.000	58.0	oo	5.69

TABLA 3.3

Refinación de celulosa nacional

REV.	°SR	T.DRENAJE s	ENERGIA KWh/kg
0	12.0	7.2	-
3000	15.5	12.0	1.29
6200	20.0	29.4	3.31
9000	29.0	53.2	4.33
9200	29.5	60.0	4.38

TABLA 3.4

Refinación de pulpas crudas con prehidrólisis a 9000 rev

TIEMPO PREHIDR.	°SR	T.DRENAJE s	ENERGIA KWh/kg	KAPPA
0	24.0	41.4	4.70	33.4
30	19.0	23.0	5.03	29.1
60	18.0	21.2	5.36	28.5
60	17.5	17.2	5.36	68.0

TABLA 3.6

Coarseness de los tipos de celulosas tratadas

TIPOS	COARSEN. mg/100m
Ext-1	15.74
Ext-2	23.46
Nacion.	23.25

TABLA 3.5

Refinación de pulpas de diferentes espesor de pared. 9000 rev

TIPO DE MADERA	°SR	T.DRENAJE s	ENERGIA KWh/kg	COARSEN mg/100m
Raleo	26	46.0	4.70	17.5
Desecho de aserreo	25	43.3	5.03	22.5

TABLA 3.7

finación de pulpas con diferentes temperaturas  
sólido. 9000 rev

MP. SOLIDO °C	°SR	T.DRENAJE s	ENERGIA KWh/kg
sin secar	26.0	50.8	4.15
50	25.0	45.2	4.48
65	24.5	42.0	4.40
80	21.5	37.8	5.40

TABLA 3.8

Refinación de celulosa con diferentes dosis  
de aditivos. 9000 rev

g aditivo/ton	°SR	T.DRENAJE s	ENERGIA KWh/kg
2216.7	24.0	42.5	3.25
1330.0	25.0	48.2	4.36
443.3	27.5	58.4	4.47
310.3	27.0	49.0	4.70
266.0	29.0	64.6	4.70
221.7	30.0	56.6	4.70
177.3	27.0	57.8	4.36
133.0	26.0	51.4	4.70
87.0	26.0	53.8	4.03
44.3	25.0	47.8	4.36
0.0	29.0	53.2	4.33

TABLA 3.9

efecto del aditivo en las propiedades del  
papel

g aditivo/ton	I. TENSION Nm/g	I. RASGADO mNm <sup>2</sup> /g	I. EXPLOS. KPam <sup>2</sup> /g
2216.7	95.0	10.7	8.2
266.0	102.0	10.4	9.1
221.7	100.6	11.4	8.6
177.3	104.9	11.6	9.2
88.7	99.4	9.8	8.8
0.0	104.1	11.5	9.1

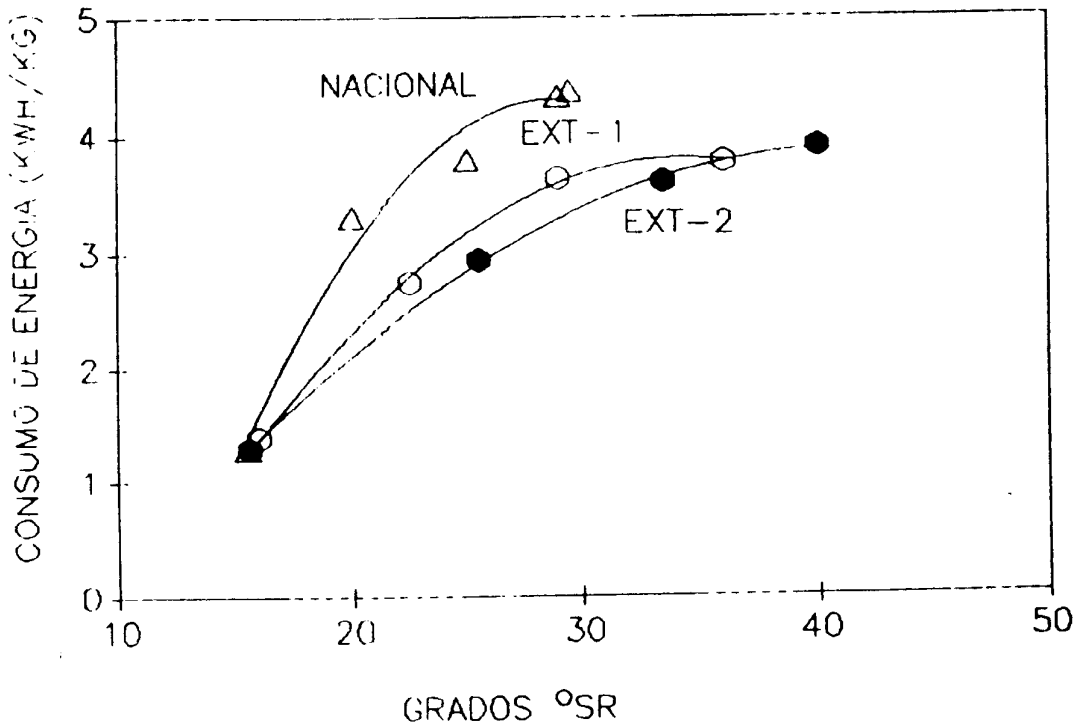
TABLA 3.10

efecto del secado en pulpas con aditivo.  
dosis de 221.7 g/ton

MP. SOLIDO °C	°SR	T.DRENAJE s	ENERGIA KWh/kg
normal	28	68.4	4.76
50	27	53.6	4.93

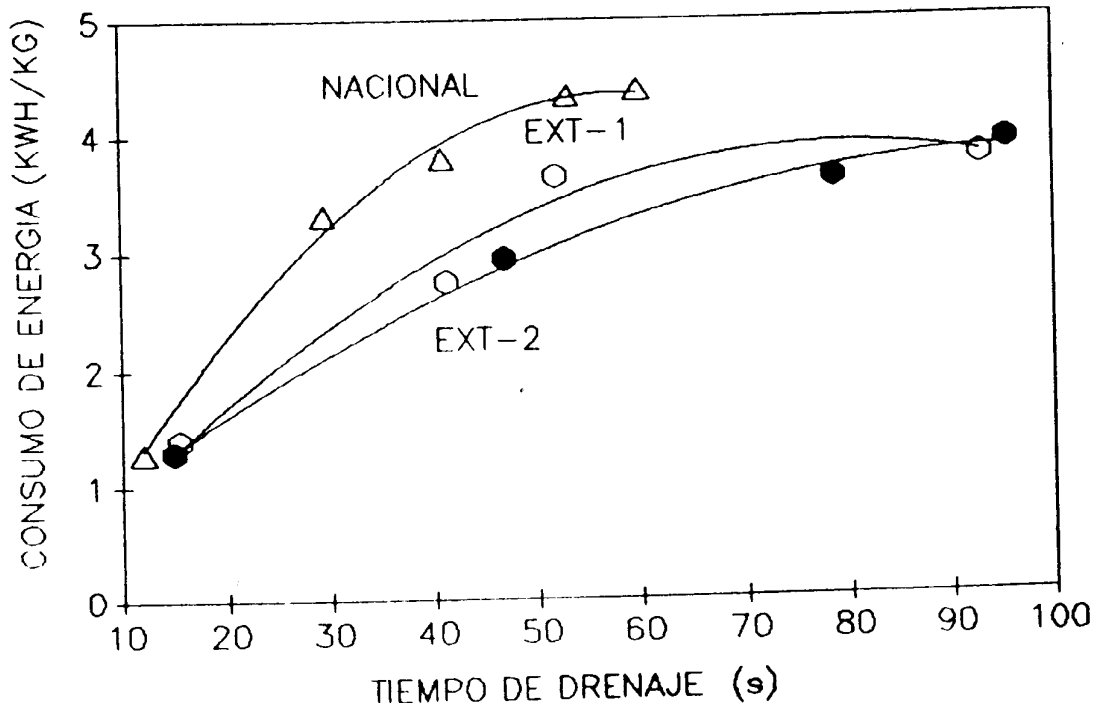
Consumo de energía de diversas celulosas relacionado con °SR

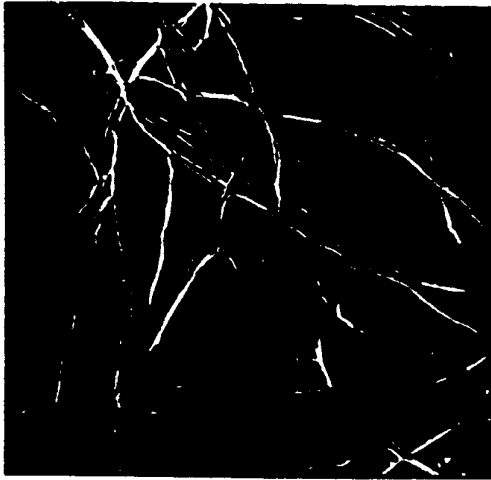
GRAFICO # 3.1



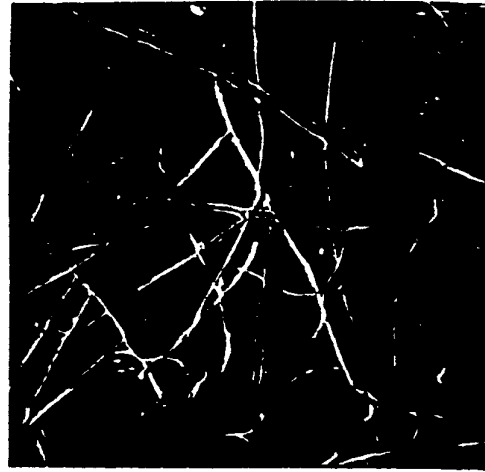
Consumo de energía de diversas celulosas relacionadas con el tiempo de drenaje

GRAFICO # 3.2





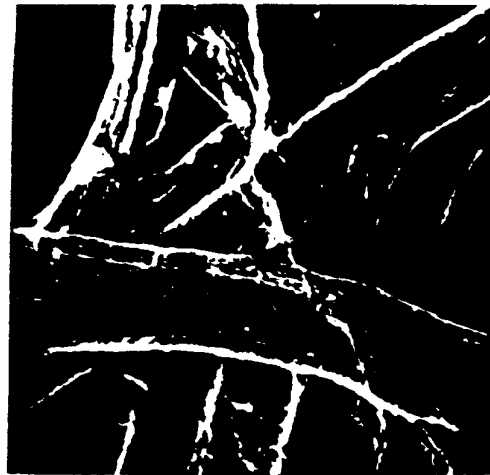
Fotografía 1. Pulpa sin secar refinada hasta 9000 rev.  
Aumento: 36 X



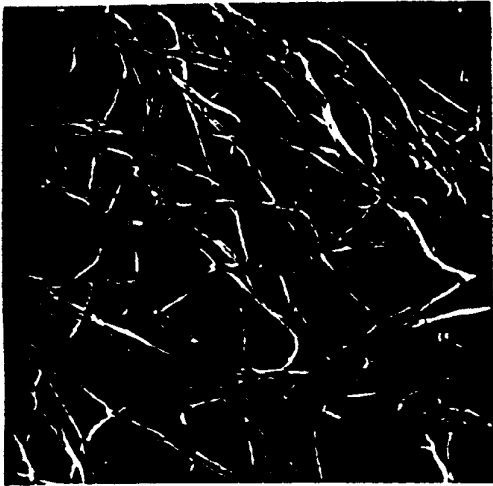
Fotografía 3. Pulpa seca hasta  $t_s = 50^\circ\text{C}$  refinada  
hasta 9000 rev. Aumento: 36 X



Fotografía 2. Pulpa sin secar refinada hasta 9000 rev  
Aumento 480 X

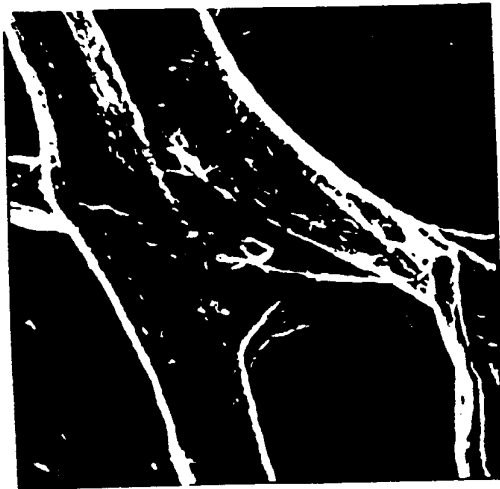
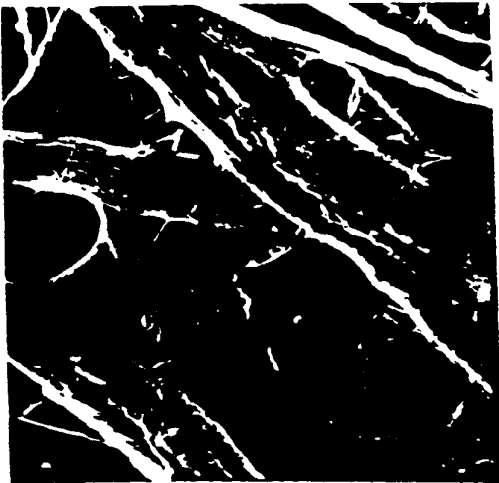


Fotografía 4. Pulpa seca hasta  $t_s = 50^\circ\text{C}$  refinada  
hasta 9000 rev. Aumento: 480 X



Fotografía 5. Pulpa seca hasta  $ts = 65^{\circ}C$  refinada hasta 9000 rev. Aumento: 36 X

Fotografía 7. Pulpa seca hasta  $ts = 80^{\circ}C$  refinada hasta 9000 rev. Aumento: 36 X



Fotografía 6. Pulpa seca hasta  $ts = 65^{\circ}C$  refinada hasta 9000 rev. Aumento: 480 X

Fotografía 8. Pulpa seca hasta  $ts = 80^{\circ}C$  refinada hasta 9000 rev. Aumento 480 X

#### 4.- DISCUSION DE RESULTADOS

=====

Al comparar las celulosas extranjeras con la nacional se aprecia cual es nuestra realidad: nuestra celulosa consume más energía en el proceso de refinación.

Al observar el gráfico 3.1 las curvas parten de una zona común, pero a medida que se continúa refinando hasta áreas de drenaje de interés para papelería la diferencia es notable con la celulosa nuestra. Se presenta la siguiente tabla, que muestra de mejor forma las diferencias entre las celulosas refinadas a 9000 rev.:

CELULOSA	°SR	kWh/k	Delta °SR	Delta kWh
Nacional	29	4.33	0	0
Extranjera 1	36	3.78	24.1	12.7
Extranjera 2	40	3.91	37.9	9.7

Por las diferencias de °SR y de consumo específico de energía eléctrica, se aprecia claramente la existencia de un problema que debe radicar en el origen de cada celulosa.

Analicemos ahora los consumos de energía de las muestras para alcanzar 25 °SR:

CELULOSA	kWh/k	Delta kWh
Nacional	4.20	0
Extranjera 1	3.25	22.6
Extranjera 2	2.80	33.3

Al hablar de hasta alrededor de un 30% de diferencia en consumos de energía, es como para poner atención a la situación. Ahora, si suponemos una producción típica de una fábrica de papel de 500 ton/día, se tendrán diferencias de consumo de energía bastante importante.

En relación a los resultados obtenidos en la experimentación variando el contenido de hemicelulosas, se encontró lo esperado, es decir, que por su naturaleza hidrofílica facilitan la penetración de agua y el inchamiento en la fibra reflejándose en la refinación de pulpas con diferentes grados de prehidrólisis.

En la tabla 3.4 se aprecia que con 30 min de prehidrólisis el drenaje disminuye considerablemente (de 24 a 19 °SR) y ésta caída de 5 puntos se asocia a una disminución importante en propiedades de resistencia mecánica del papel. Cuando se aumentó el tiempo de prehidrólisis a 60 min, se observó una diferencia ínfima en el drenaje (de 19 a 18°SR), lo que nos indica que con 30 min de hidrólisis se solubilizan prácticamente todas las hemicelulosas y el resto de oligómeros.

A través de estos resultados ya se intuye que debe existir otra causa distinta de las hemicelulosas que provoque aumentos de energía en la refinación de nuestra celulosa. Esto es porque al compararla con la celulosa Extranjera 1, se observa una diferencia de 7 °SR, y aquí se ha demostrado que con hidrólisis severas cae el drenaje en 6 puntos. Además, a nuestra astilla se le trata con un pulpaje convencional y estándar al de otras plantas extranjeras y nos consta que aquí no se le hace hidrólisis, y además por literatura se sabe que la cantidad de hemicelulosas en maderas como el pino es regular y es entre 20-25% (excluyendo los extraíbles en alcohol-benceno) (6). ¿Qué tenemos entonces? que a pesar que las hemicelulosas sí influyen en el proceso de refinación, éstas no ocasionan el alto consumo de energía de la celulosa chilena, tal vez en una pequeña porción pero no es el principal factor.

Aprovechando los experimentos con prehidrólisis, se analizó una pulpa con 60 min de tratamiento con kappa de 68 y se comparó con otra de kappa 28.5. Como tienen el mismo nivel de hidrólisis y muy pocas hemicelulosas, el único factor de variación es la presencia de lignina. Se ve que no tiene efecto en la refinación, ya que al tener una diferencia de casi 40 en kappa, el drenaje varió de 18 a 17.5 °SR y casi sin variación en los consumos de energía.

Es interesante observar los resultados de coarseness de las celulosas blancas tratadas. La celulosa extranjera 2 y la nacional muestran valores similares, pero al refinarlas hasta 9000 rev se obtiene una diferencia de schoper de 11 puntos. Ahora, si consideramos la celulosa extranjera 1 y 2, ésta última presenta un coarseness mayor en 8 unidades. Con esto se esperaría que la celulosa se refinara con mayor dificultad, pero al refinar hasta 9000 rev, se encuentra exactamente lo contrario.

Se resalta este resultado, porque desde el punto de vista morfológico se determina que el espesor de pared (es proporcional al coarseness) no es importante en la refinación. Esto nos indica que el esfuerzo mecánico aplicado sobre la fibra tendrá mayor o menor efecto independientemente del espesor de pared celular, sino que son más importantes sus características químicas y daños estructurales provocados por el proceso, como el de secado.

Debido a que la estructura química y morfológica de la fibra no explican el mayor consumo de energía en la refinación de pino insigne, se comenzó a buscar una respuesta en el proceso. Se analizó el secado, el cual influye notablemente en la refinación.

En la tabla 3.7 se ve la importancia del secado. Al aumentar las condiciones de secado, se observa una gran caída en el drenaje, lo que reafirma la teoría de que producto de la rigidez de la fibra seca, la penetración de agua se hace más difícil, provocando mayores consumos de energía (de 4.15 a 5.4 kWh/k). Reafirma este resultado las fotografías que muestran la fibrilación, siendo muy escasa en las fibras que alcanzaron de 80°C. Además, por observaciones y conversaciones personales en la industria, no existe una preocupación por controlar en forma eficiente el secado, sino que interesa únicamente el seco final, y se trata de lograr sin ningún cuidado. Luego, el agua libre sale muy rápidamente debido al secado severo y la temperatura superficial de la fibra sube ocasionando daños severos a la fibra.

Pensando en indagar en caminos nuevos de investigación, se incorporó el empleo de aditivos. Se encontró que existe una zona donde el aditivo funciona, pero no tiene un comportamiento espectacular. Esta zona se encuentra en los 200 g/ton, donde las propiedades físico-mecánicas se mantuvieron y/o fueron levemente superiores a una pulpa sin aditivo.

Además, se optó por hacer una prueba de secado con el aditivo, ya que si se empleara en una fábrica de celulosa, debe agregarse antes de secarse. Se le agregó una dosis de 222 g/ton y al secar la pulpa, el drenaje disminuyó en 1 °SR y existe un aumento en el consumo de energía de 4,76 a 4,93 kWh/kg. No es fácil determinar si el aditivo perdió alguna de sus características hidratantes o el efecto del secado es el predominante.

## 5.- CONCLUSIONES

=====

- 1.- La celulosa blanca chilena es más difícil de refinar que las celulosas extranjeras.
- 2.- La presencia de hemicelulosas afecta bastante el proceso de refinación, pero no justifica el alto consumo de energía de la celulosa chilena.
- 3.- La lignina no es factor importante en la refinación.
- 4.- El espesor de pared no es relevante en la refinación.
- 5.- La forma de secar la celulosa, afecta la refinación si se alcanzan temperaturas altas.
- 6.- Existe una zona donde el aditivo funciona mejorando la refinación y levemente las propiedades de resistencia. Esta zona es de alrededor de 200 g/ton.

## 6.- REFERENCIAS

=====

- 1.- Pires, F.S.; Kuan, G.S.S.; Bugdajes, S., "Potencial de Economía de Energía na Refinacao de Pastas Celulósicas". II Congreso Latinoamericano de Celulosa y Papel, Torremolinos, Málaga, España, 22-26, Junio 1981. STS, pag.111.
- 2.- Barbadillo Gómez, P. "las Hemicelulosas y su Influencia en el Proceso de Fabricación de Papel", ATCP, 9(5),293.
- 3.- Turrado, J.; Fonseca, S., "Identificación y Efecto de las Hemicelulosas sobre las Propiedades Físicas de la Celulosa y el Papel" . II Congreso Latinoamericano de Celulosa y Papel, Torremolinos, Málaga, España, 22-26 Junio, 1981, STS, pag 149.
- 4.- MacDonald, R., "Pulp and Paper Manufacture", Vol. 3, "Paper-making and Paperboard Making", 147-148, II edición, McGraw-Hill Book Company, New York, 1970.
- 5.- MacDonald, R., obra citada, 407-409.
- 6.- Melo, R.; Paz, J., "Celulosa Soluble a partir de Madera de Pinus Radiata en Chile". OEA, Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico, 46-47, 1970.

## CONDICIONES EXPERIMENTALES

=====

### Pulpaje con madera de raleo

Alcali efectivo (c. % NaOH): 18  
Relación de baño (L/M) : 9/2  
Sulfidez (%) : 32.4  
Tiempo hasta temper. (min) : 60  
Tiempo a temperatura (min) : 85  
Temperatura máxima (°C) : 175

Rendimiento (%): 46.8  
I. Kappa : 34.5

### Pulpaje con madera de deshecho de aserreo

Alcali efectivo (c. % NaOH): 18  
Relación de baño (L/M) : 9/2  
Sulfidez (%) : 32.4  
Tiempo hasta temper. (min) : 60  
Tiempo a temperatura (min) : 75  
Temperatura máxima (°C) : 175

Rendimiento (%): 47  
I. Kappa : 35

### Pulpajes con prehidrólisis

Tiempo de hidrólisis (min) : 0  
Alcali efectivo (c. % NaOH) : 18  
Relación de baño (L/M) : 7/1  
Sulfidez (%) : 32.4  
Tiempo hasta temper. (min) : 80  
Tiempo a temperatura (min) : 150  
Temperatura máxima (°C) : 170

Rendimiento (%): 46.7  
I. Kappa : 33.4

Temp. hidrólisis (°C) : 160  
Tiempo de hidrólisis (min) : 30  
Alcali efectivo (c. % NaOH) : 18  
Relación de baño (L/M) : 7/1  
Sulfidez (%) : 32.4  
Tiempo hasta temper. (min) : 80  
Tiempo a temperatura (min) : 93  
Temperatura máxima (°C) : 170

Rendimiento (%): 40.8  
I. Kappa : 29.1

Temp. hidrólisis (°C) : 160  
Tiempo de hidrólisis (min) : 60  
Alcali efectivo (c. % NaOH) : 18  
Relación de baño (L/M) : 7/1  
Sulfidez (%) : 32.4  
Tiempo hasta temper. (min) : 80  
Tiempo a temperatura (min) : 90  
Temperatura máxima (°C) : 170

Rendimiento (%): 39.5  
I. Kappa : 28.5

Temp. hidrólisis (°C) : 160  
Tiempo de hidrólisis (min) : 60  
Alcali efectivo (c. % NaOH) : 18  
Relación de baño (L/M) : 7/1  
Sulfidez (%) : 32.4  
Tiempo hasta temper. (min) : 80  
Tiempo a temperatura (min) : 43  
Temperatura máxima (°C) : 170

Rendimiento (%): 35  
I. Kappa : 68

### Pruebas de secado

Estas pruebas se realizaron en un secador rotatorio calefacionado con resistencias eléctricas.