



## Mediciones y análisis de la sección de secado – Parte 2

### Introducción

En el artículo anterior, publicado en la edición 11, exploramos un poco acerca del desempeño de la sección de secado, principalmente con respecto a la transferencia de calor al cilindro secador y, consecuentemente, a la hoja, y la importancia de la tela secadora en este proceso.

La intención aquí es desarrollar un poco más el tema, planteando la importancia de las mediciones de humedad del aire de los bolsillos. A fin de cuentas, los bolsillos saturados resultarán en bajo diferencial entre las presiones parciales de vapor de la hoja y del aire con la consecuente reducción en la transferencia de masa de agua de la hoja hacia el aire.

Tal reducción frecuentemente se debe al movimiento insuficiente de aire dentro del bolsillo, provocado por la operación deficiente del sistema de ventilación u obstrucción de la tela secadora.

### 1. Condicionamiento del bolsillo

Se aísla la sección de secado por la capota, que tiene la función de contener el agua evaporada en el proceso de secado, proporcionar un ambiente uniforme de secado, controlando los caudales de aire, temperatura y humedad, además de reducir la energía necesaria para evaporación. En esta discusión, no se profundizará el estudio de la capota y su balance de masa y energético, sino en el condicionamiento de los bolsillos y sus implicaciones.

El condicionamiento del bolsillo es parte fundamental en el proceso de secado de la hoja. La tela secadora es la principal responsable, debido a su permeabilidad, que permite que el aire más seco entre en el bolsillo y el aire más húmedo salga de él. La tela secadora crea un caudal considerable de aire en la superficie. En el "nip" de entrada del bolsillo se establece una zona de presión negativa con efecto de succión del aire, además del efecto cuña contra el rodillo, forzando la entrada del aire para dentro del bolsillo. En el "nip" de salida se crea una zona de mayor presión, que fuerza el aire a través de la tela hacia afuera del bolsillo.

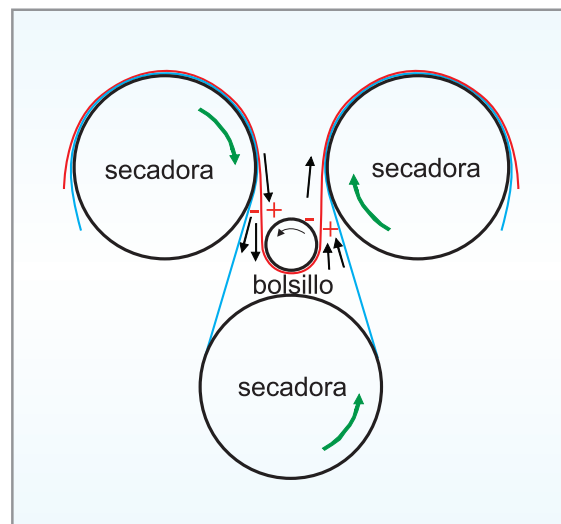


Figura 1: Movimiento de aire en el bolsillo, inducido por el movimiento de la tela y rodillo guía

Las cajas o conductos sopladores, o incluso rodillos ventilados, se utilizan para promover una condición uniforme de secado en el bolsillo y también para aumentar la capacidad de secado.

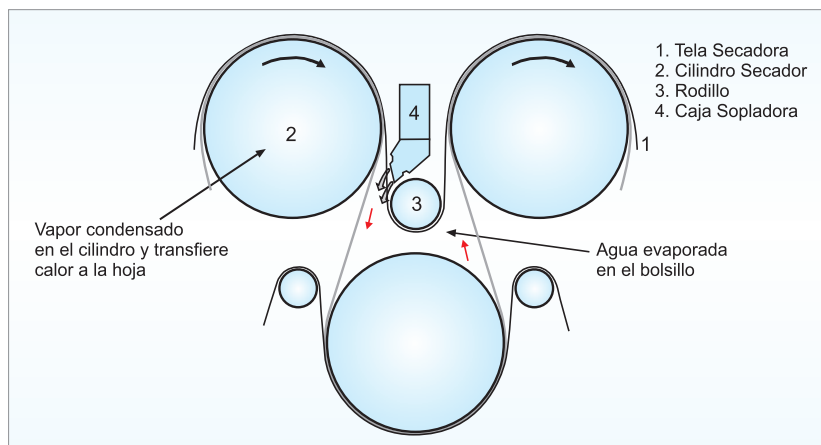


Figura 2: Ejemplo de un bolsillo y su acondicionamiento, operando con telas superiores e inferiores

## 2. Análisis de la humedad del bolsillo

El higrómetro es la forma más usual para evaluar el comportamiento del aire de los bolsillos y medir las temperaturas del bulbo seco y húmedo.

Se recomienda hacer la recolección de los datos en el centro geométrico del bolsillo o en las mismas distancias del rodillo y/o tela secadora, dependiendo de la configuración del bolsillo, teniendo el cuidado de no tener la interferencia directa de la temperatura del cilindro secador y, aproximadamente, 1,0 a 1,5 metros hacia el bolsillo.

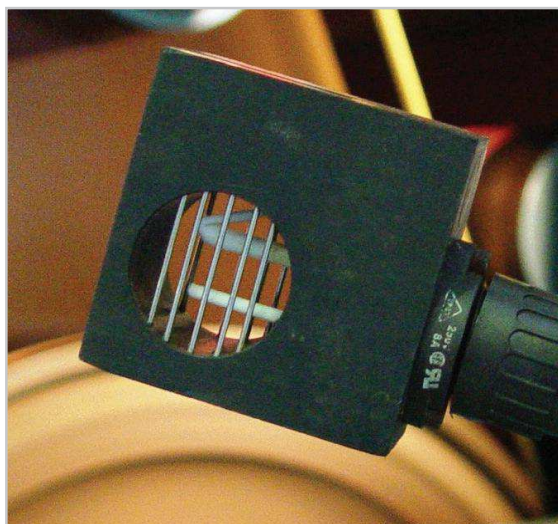


Imagen 1: Higrómetro con los termómetros de bulbo seco y húmedo

Evaluando estas temperaturas se puede entender su comportamiento en cada bolsillo. En el ejemplo a continuación, los números impares se refieren a los cilindros superiores y sufren la influencia de la temperatura menor del aire, procedente del sótano de la máquina, y arrastrado por la tela secadora inferior. (véase la ubicación de los cilindros en la Figura 3)

Hasta el cilindro 13 son cilindros del primer grupo de secado. En esta región, las temperaturas de bulbo seco y húmedo están muy cerca debido a la falta de insuflación.

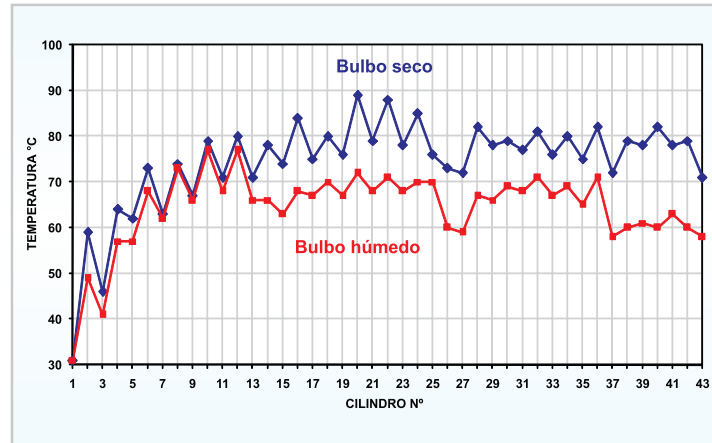


Gráfico 1: Ejemplo de una medición en cada bolsillo del secado

### 2.1. Análisis de la humedad absoluta del bolsillo

Por medio de las temperaturas de bulbo seco y húmedo podemos evaluar la humedad absoluta del aire, que nos indica la cantidad de vapor de agua con relación a la cantidad de aire seco (kg H<sub>2</sub>O / kg aire seco), aplicando la fórmula a continuación, o evaluando la carta psicrométrica.

La humedad absoluta es la masa de vapor de agua dividida por la masa de aire seco en un volumen de aire a una temperatura específica. Cuanto más caliente es el aire, más agua él puede contener. Cálculo de humedad absoluta de acuerdo con las temperaturas de bulbo seco y húmedo.

$$x_v' = 0,62197 \frac{p_v'}{p - p_v'} \quad p_v' = \exp \left( 11,78 \frac{\theta_w - 99,64}{\theta_w + 230} \right)$$

$$x = \frac{1,0048 (\theta_w - \theta_d) + x_v' (2501 - 2,3237\theta_w)}{2501 + 1,86\theta_d - 4,19\theta_w}$$

Por lo que:

- x = humedad absoluta (kg H<sub>2</sub>O / kg aire seco)
- p = Presión (en el nivel mar 1,013 bar)
- θ<sub>w</sub> = Temperatura bulbo húmedo (°C)
- θ<sub>d</sub> = Temperatura bulbo seco (°C)

Utilizando el mismo ejemplo del gráfico de las temperaturas de bulbo seco y húmedo, es posible determinar las humedades absolutas de cada bolsillo, según se ve a continuación.

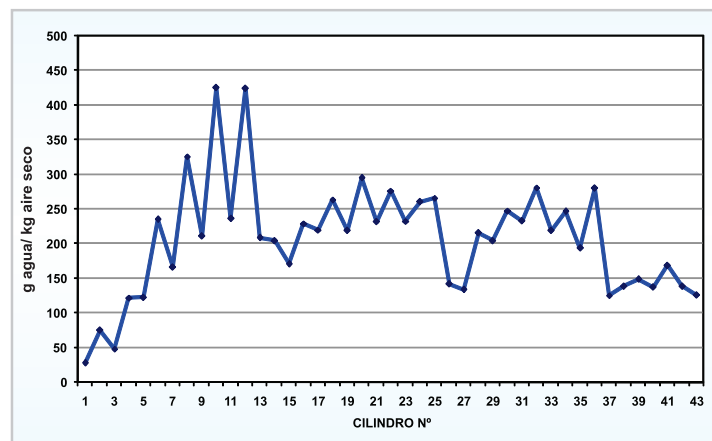


Gráfico 2: Ejemplo de la determinación de la humedad en cada bolsillo de secado

En este ejemplo, se puede observar que varios bolsillos están con humedad superior a lo que se recomienda para este tipo de papel y configuración de máquina, que es de 200 grs de agua/kg aire seco.

Las humedades son superiores bajo cilindros pares debido a las altas temperaturas de bulbo húmedo. En este caso, la falta de acondicionamiento en los bolsillos de la tela superior es más significativa para la humedad absoluta, según podemos observar en el esquema a continuación.

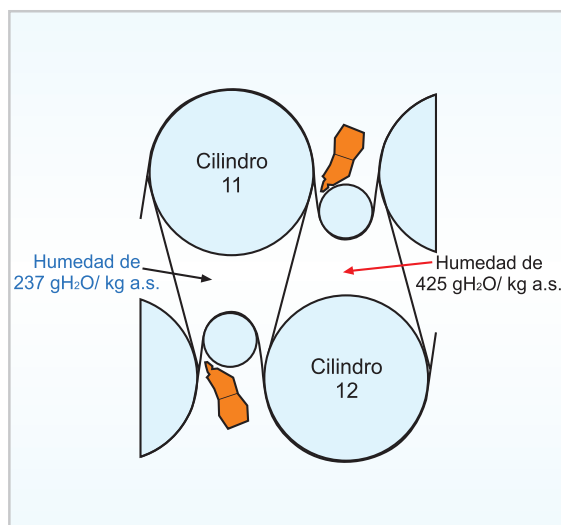


Figura 3: Análisis de la humedad de los bolsillos

Además de la permeabilidad, el diseño de la tela secadora también puede tener gran influencia en el acondicionamiento del bolsillo.

Actualmente, se puede contar con telas secadoras con capacidad de proveer y eliminar mayor cantidad de aire del bolsillo debido a su característica constructiva.

En el ejemplo a continuación, se puede observar una tela con característica más aerodinámica, proporcionando un mejor acondicionamiento del bolsillo.

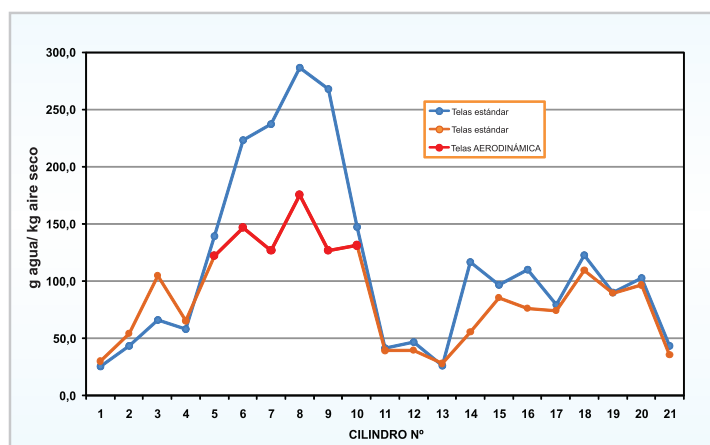


Gráfico 3: Máquina de papel imprimir y escribir y el uso de dos telas aerodinámicas en el 2° grupo

Una duda frecuente es cuánto representa en logros financieros el mejor acondicionamiento del bolsillo y consecuente reducción de la humedad absoluta. No hay forma de saber exactamente y dependerá del tipo y papel y de la configuración de la máquina.

En la práctica podemos observar la reducción en el consumo de vapor y aumento de la productividad, cuando la máquina está limitada por vapor y mejoras del perfil de humedad de la hoja.

Una estimación de logros con la reducción de la humedad absoluta del bolsillo se presenta en el gráfico a continuación.

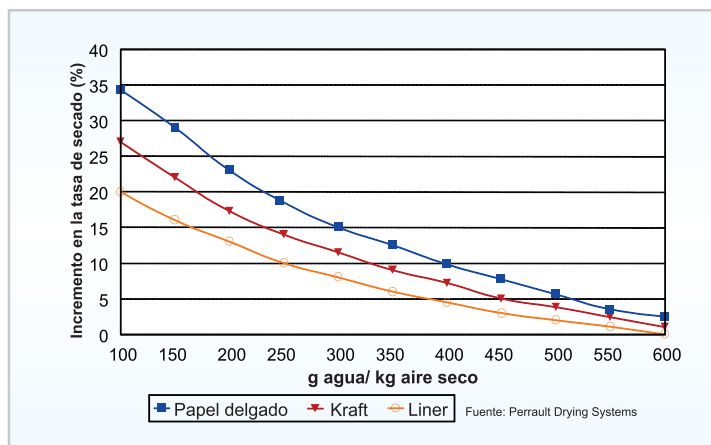


Gráfico 4: Efecto de la reducción de la humedad del bolsillo en la tasa de secado en los varios papeles

Con esta estimación se puede concluir que una reducción de 300 a 250 g H<sub>2</sub>O/kg de aire seco representa un incremento de secado del 2 al 4%, dependiendo del tipo de papel, lo que representará directamente una reducción en el consumo de vapor.

Otro análisis importante es la evaluación del perfil de humedad de los bolsillos. El aire bombeado para dentro del bolsillo es función de la velocidad de la máquina, tipo de tela, permeabilidad y geometría de la máquina.

Telas secadoras con la permeabilidad original alterada (tapadas) o baja permeabilidad de diseño tendrán una influencia muy fuerte en los problemas de perfil de humedad del bolsillo y, consecuentemente, pueden traer problemas de perfil de humedad de la hoja, inestabilidad de la hoja y limitaciones del secado.

En el ejemplo a continuación, se puede observar la influencia de la permeabilidad en el acondicionamiento del bolsillo.

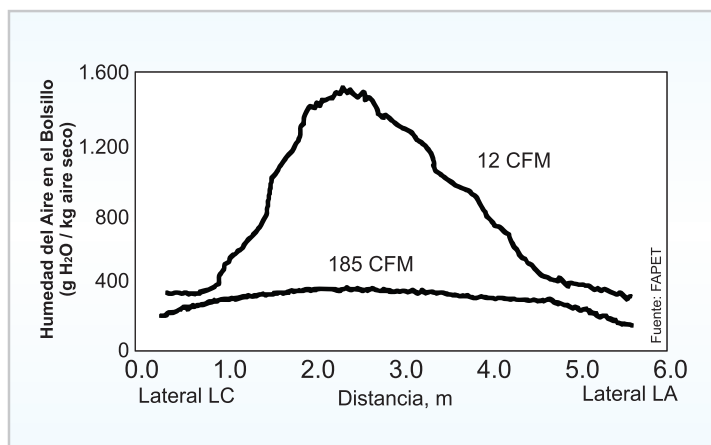


Gráfico 5: Influencia de la permeabilidad de la tela secadora en la humedad del bolsillo

La configuración de las cajas sopladoras puede variar dependiendo del tipo de papel y de la velocidad de la máquina. Pero, además de mejorar la tasa de secado, uno de los principales objetivos es mejorar el perfil de humedad del bolsillo.

En la figura a continuación, podemos observar el perfil de humedad en el bolsillo con el ventilador en servicio y fuera de servicio en una máquina de papel de imprimir y escribir.

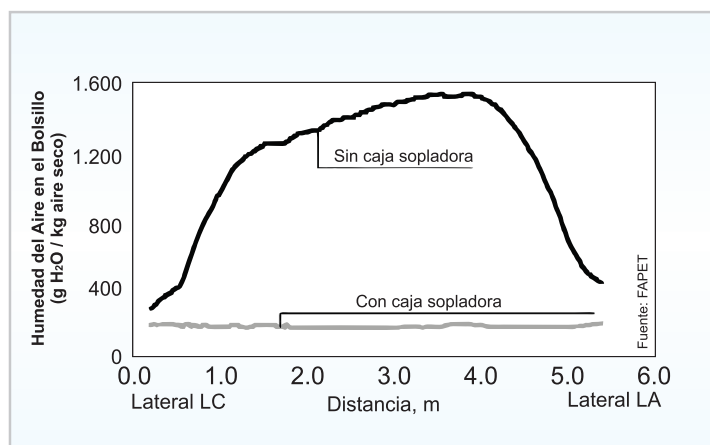


Gráfico 6: Influencia de la caja sopladora en el perfil de humedad en el bolsillo

El perfil de humedad no debe tener variación superior a 50 grs H<sub>2</sub>O/ kg aire seco, según recomendaciones de la TAPPI. Se han diseñado y construidos el sistema de calentamiento, conductos de suplementos, extractores y ventiladores para resistir a la presión del sistema, que se puede controlar en los ventiladores (frecuencia accionamiento o basculantes), o aún controles manuales en cada bolsillo.

Se utilizan con frecuencia permeabilidades menores de las telas en los primeros grupos de secado, cuando la hoja es más débil y el funcionamiento de la máquina es más crítico. Gradualmente, se aplican mayores permeabilidades para permitir más caudal de aire para favorecer el secado.

## 2.2. Análisis de la humedad relativa del bolsillo

También se puede evaluar la humedad relativa del bolsillo a partir de las temperaturas de bulbo seco y húmedo. Este parámetro es bastante conocido porque se lo utiliza en nuestro día a día. Cuanto menor sean las diferencias de temperatura de bulbo seco y húmedo, mayor será la humedad relativa, y viceversa.

La humedad relativa del aire es la relación entre la cantidad de agua existente en el aire (humedad absoluta) y la cantidad máxima que podría haber en la misma temperatura (punto de saturación).

La humedad relativa se expresa como porcentaje (%). Debido a que la humedad máxima depende de la temperatura, la humedad relativa cambia con la temperatura, incluso cuando la humedad absoluta permanece constante.

En el bolsillo, la recomendación es que la humedad relativa esté cerca del 50% al 60%. Valores muy superiores pueden traer problemas de calidad, tales como manchas y agujeros en el papel, debido a un ambiente en constante condensación de agua, en los bolsillos y en la capota.

Otro problema está relacionado con la corrosión de cilindros y demás componentes, principalmente, en el primer grupo, en el cual las temperaturas de bulbo son menores y la posibilidad de condensación es mayor. Humedades relativas superiores al 60% tienen impacto logarítmico en el proceso de corrosión, según se puede observar a continuación.

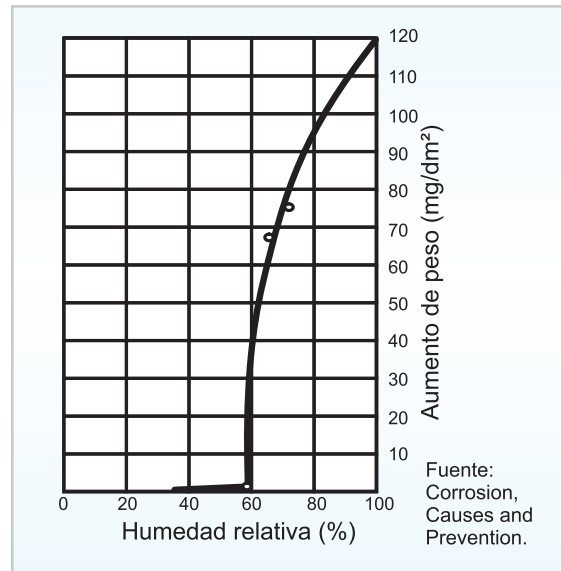


Gráfico 7: Efecto de la humedad relativa del aire en la corrosión electroquímica del acero

### 3. Análisis de la fuerza motriz de secado

En el artículo anterior (parte 1), se ha observado la importancia de conocer la temperatura de la hoja de papel, y con esta temperatura se calcula la presión parcial de la hoja (mmHg). Se calcula la presión parcial del aire de acuerdo con las temperaturas de bulbo húmedo. El proceso de evaporación está directamente relacionado con las diferencias de estas presiones, según se puede observar a continuación.

Evap=K x A x (Pf-Pa) donde: Evap

= Agua evaporada de la hoja

Pf = Presión de vapor del agua en la hoja

Pa = Presión parcial del vapor de agua en el aire

A = Área de exposición de la hoja

K = Coeficiente de transferencia de masa

Cuanto mayor es la diferencia entre la presión parcial de vapor en el aire con relación a la de la hoja, mayor será la tendencia de transferencia de masa y, consecuentemente, mayor será la tasa de evaporación. Se puede observar, en el ejemplo a continuación, que cuanto menor es la humedad del bolsillo, menor será la presión del aire.

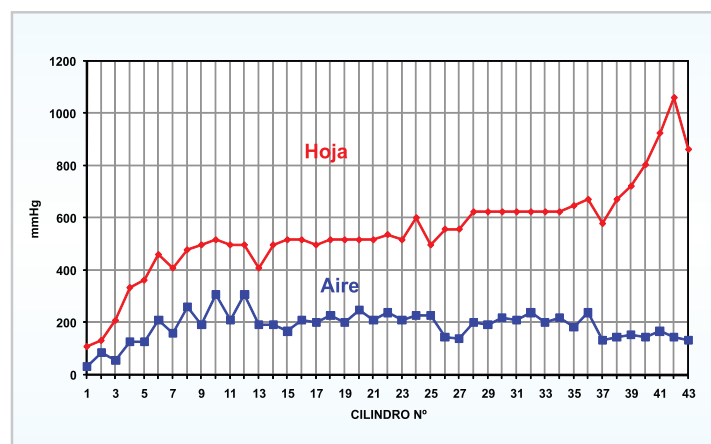


Gráfico 8: Presiones de vapor de la hoja y del aire

Por lo tanto, la diferencia entre estas dos curvas nos indica el potencial de transferencia de masa, conocida como fuerza motriz, según se representa en el gráfico 8.

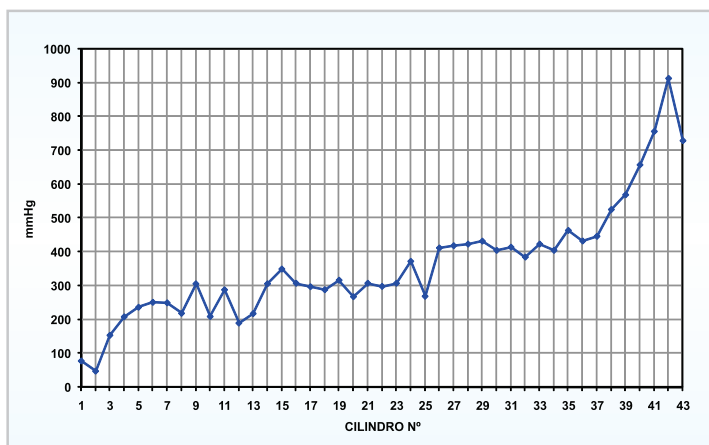


Gráfico 9: Evaluación de la fuerza motriz de secado

En la etapa de evaporación constante es normal obtener valores entre 150 a 400 mmHg. Sin embargo, hay una serie de factores que influyen en el resultado final, tales como gramaje, tipo de papeles, entre otros. En este caso, es importante compararlo con el histórico de la máquina.

### Conclusión

El costo de energía está aumentando visiblemente en la última década, y esto ha reducido la competitividad de muchas fábricas, principalmente las que no están enfocadas en la conservación de energía. La sección de secado es el principal consumidor de energía de la máquina. Luego, perfeccionar el proceso de secado puede ser relevante en la reducción de los costos operacionales.

Máquinas con buen desempeño en el secado usan de 1,13 a 1,20 kg vapor/ kg H<sub>2</sub>O evaporado en el sistema de drenaje del cilindro, y de 0,18 a 0,20 kg vapor/ kg H<sub>2</sub>O evaporado para calentamiento del aire de insuflación.

Los análisis y ejemplos que se han presentado aquí son algunos de los parámetros para análisis de eficiencia de secado. Ellas permiten la identificación de oportunidades de mejoras.

### Referencias:

1. TAPPI – Dryer section performance monitoring - TIP 0404-33.
2. FAPET – Papermaking Science and Technology Books – Book 9/Drying – Chapter 9 / Dryer section ventilation and heat recovery.
3. Análise técnica da seção de secagem – Felt na Fabric Facts – Albany International – Marcos Emídio Bressani.
4. Paper machine audits drying – TAPPI Paper Machine Audits 2005 – Jim Atkins presentation.
5. Corrosion, Cause and Prevention, 3rd edition, McGraw-Hill, New York, 1951,p.168.
6. Fundamentos da corrosão metálica – Prof. Dr. Sebastião Elias Kuri – UFSC - Mesa redonda ABTCP – 2010.
7. Understanding and troubleshooting the papermachine dryer section – G.W.F. Robinson and C.D. Baker. – Technical Section – Canadian Pulp and Paper Association.
8. Optimizing Steam Use in the dryer Section – Jim Nastrom / Mike Soucy – Kadant Johnson Canada.

### Perfil del autor:

Sérgio Luiz Pereira es Técnico en Celulosa y Papel por el SENAI (Telêmaco Borba/PR), graduado en Ingeniería Química por la FURB (Blumenau/SC), con Posgrado en Procesos Textiles por el SENAI/UFSC (Blumenau/SC). Inició sus actividades en la PCC – actual unidad de Klabin, en Correia Pinto, y trabaja hace 19 años en Albany Internacional. Actualmente, es Coordinador de Productos – Telas Secadoras.