



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGETICA EN
LA LINEA DE SECADO EN PAPELSA S.A.**

Magda Manuela Hincapie Alvarez

**Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería
Química
Medellín, Colombia
2020**



MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGETICA EN LA LINEA DE SECADO EN PAPELSA S.A.

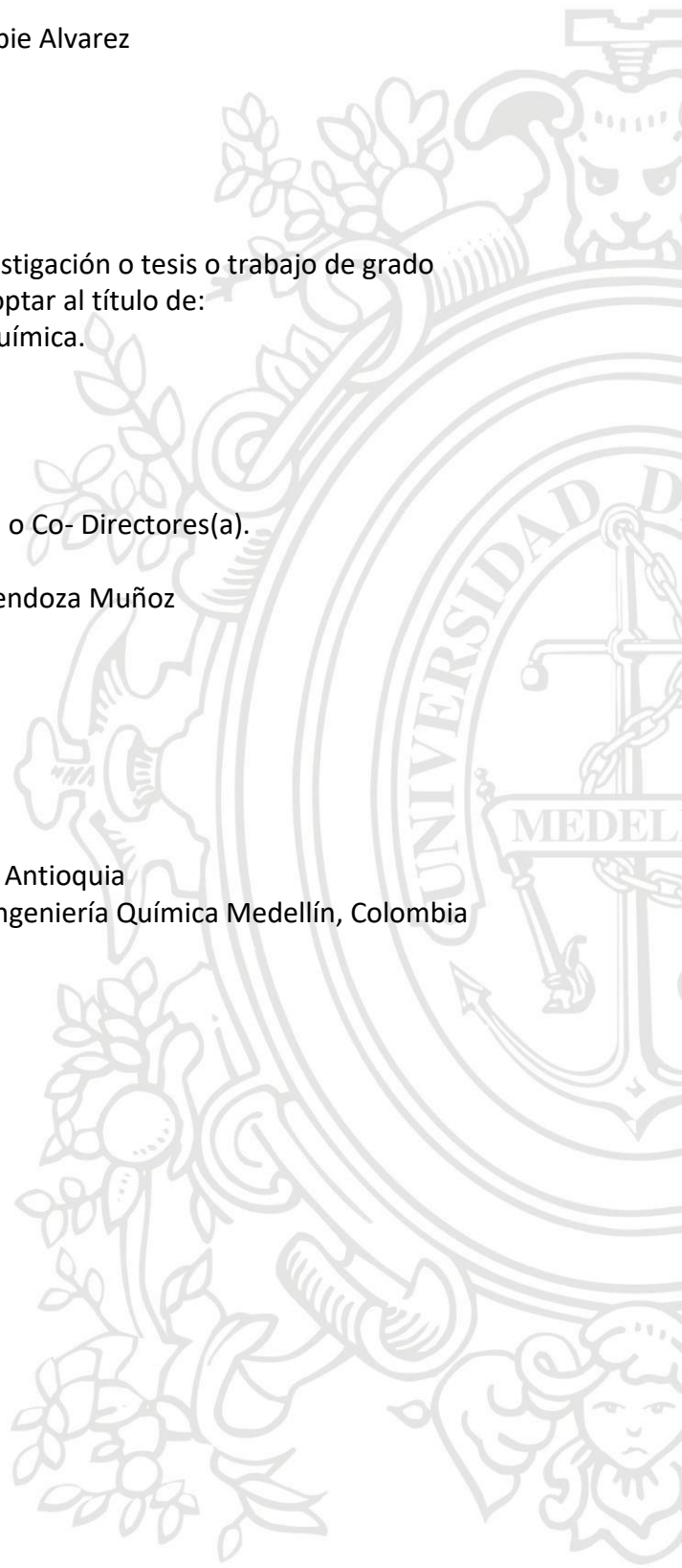
Magda Manuela Hincapie Alvarez

Informe de práctica o monografía o investigación o tesis o trabajo de grado
como requisito para optar al título de:
Ingeniera Química.

Asesores (a) o Director(a) o Co- Directores(a).

Diego Fernando Mendoza Muñoz

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química Medellín, Colombia
2020



MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGETICA EN LA LINEA DE SECADO DE PAPEL EN PAPELSA S.A.

Resumen

El proceso de secado del papel es la operación que permite darle las características y propiedades requeridas al producto terminado. En PAPELSA S.A. allí, se contaba con humedades relativas elevadas, lo que ha provocado problemas de corrosión en los rodillos de la máquina, principalmente en las primeras secciones. Con las mediciones realizadas se lograron modificar variables de proceso que ayudaron a mejorar estas condiciones. Adicionalmente, con el balance de masa se identificaron oportunidades de mejora energética, así como la caracterización parcial del sistema ya que era desconocido.

Introducción

En el 2017 PAPELSA S.A finalizó la ampliación del molino y adicionalmente se realizaron actualizaciones en ciertas partes del proceso de producción de papel. Actualmente, cuentan con el molino más moderno de todo el país, con una capacidad de producir hasta 350 toneladas de papel al día. Luego de la ampliación, no se han realizado balances ni estudios que permitan caracterizar las condiciones de operación actuales. El proceso de secado en la producción de papel, es de las operaciones más complejas e importantes dentro del proceso productivo. En PAPELSA S.A. se estaban presentando problemas de corrosión en algunas de las secciones de secado debido a la alta humedad en estas zonas. El proyecto aquí planteado busca en primera instancia caracterizar la línea de secado mediante balances de masa y energía, para que posteriormente, conociendo el sistema, sea posible evaluar posibilidades de optimización y mejoramiento energético. Se partirá del planteamiento de sistemas que abarquen grupos de equipos y corrientes, para que posteriormente, sea posible realizar estudios adicionales que permitan llegar más al detalle. Se centrará el interés en realizar seguimiento y evaluar posibles mejorar en las condiciones del aire dentro del HOOD. Después, planteando balances de masa y energía por sistemas, que abarquen las corrientes fundamentales e importantes dentro del proceso; se buscará obtener el modelo matemático que permitirá caracterizar el sistema luego de realizar la medición de las variables requeridas, para finalmente, obtener valores de las corrientes y condiciones de operación en las diferentes líneas. Con los datos obtenidos se realizarán análisis y se evaluarán posibles oportunidades de mejora y modificación de variables dentro del proceso. Este

estudio tiene un alto impacto para la empresa, ya que le brindará información actualmente desconocida, así como recomendaciones, que podrán adoptar, con el fin de alcanzar poco a poco, un punto óptimo dentro de su operación. También, les abrirá el camino en la profundización y conocimiento de su sistema recientemente instalado, pues, los resultados obtenidos serán las bases para estudios futuros.

Objetivo general

Determinar una relación consumo de vapor / agua evaporada que incremente la eficiencia energética del proceso de secado del papel.

Objetivos específicos

- Caracterizar los consumos de masa y energía del proceso de secado del papel en las condiciones actuales.
- Encontrar un valor apropiado para la humedad absoluta en el aire de salida de la unidad de secado, que permita reducir el consumo de vapor y mejorar la transferencia de masa y calor en el sistema.

Marco Teórico

En la industria papelera, el proceso de secado es una de las operaciones más complejas e importantes, ya que permite darle las características requeridas al producto terminado, tales como el peso base y la humedad; donde se espera que este último alcance un valor entre el 6-9% [2], dependiendo del tipo de papel que se esté fabricando.

El agua es eliminada del papel a partir de diferentes operaciones consecutivas, partiendo del drenaje de está usando vacío, luego de esto, las hojas de papel son llevadas a las prensas, donde a la salida de estas cuentan con una humedad entre el 33 y 55% [2]. Aunque la eliminación del agua a partir de medios mecánicos es eficiente, este no es suficiente para completar el proceso de secado del papel; es por esto, que se emplean medios térmicos, y allí la cantidad de agua presente en el papel es reducida a través de evaporación.

El secado en la industria del papel puede realizarse por varios métodos, entre los más destacados se encuentran, el procedimiento donde se emplean cilindros huecos, en los cuales se inyecta vapor; otra es el secado a partir de lámparas que emiten luz infrarroja y por último el secado *through*, que consiste en la implementación de cilindros perforados por los cuales se inyecta aire y este se encarga de secar el papel. La tecnología dominante en la industria es la primera, anteriormente mencionada, donde se emplean múltiples cilindros huecos en acero al carbón; ya que es más rentable respecto a las otras tecnologías. Como se mencionó anteriormente, a estos cilindros huecos se les

inyecta vapor, el cual gracias al contacto entre el secador y la vestidura; conocida como lona, la cual no es más que una especie de tela, generalmente fabricada de polímeros, facilita la transferencia de calor entre el secador y el papel, a su vez que lo guía mientras realiza la trayectoria a lo largo del tren de secado, mientras se inyecta y extrae aire a lo largo del proceso, con el fin de que el agua migre del papel hacia este.

Algunas de las variables más importantes en el proceso de secado del papel son:

Temperatura: ya que un aumento en esta variable lleva a aumentar la presión de vapor del agua en la fase líquida y reducirla en la fase de vapor, lo que se traduce en un aumento en la velocidad de secado.

Humedad: Esta propiedad es fundamental para el aire que se encarga de absorber el agua que es evaporada del papel y quien le da el potencial de absorber las moléculas de agua.

Velocidad: Esta se refiere a rapidez de secado, la cual va ligado directamente a la saturación del aire, ya que, si la presión de vapor del agua presente en el aire aumenta, este se saturará y si el tiempo de residencia de este aire saturado es elevado, se puede presentar que la transferencia de masa del agua del papel hacia el aire no se complete, provocando alta humedad en el producto final o incluso corrosión en la máquina.

Además de estos parámetros, es importante tener en cuenta que durante el proceso se puede generar condensados, y es por esto que el sistema de secado debe contar con una unidad encargada del tratamiento y aprovechamiento de estas corrientes. SEGÚN la norma TAPPI existe un procedimiento certificado para la medición de estas corrientes. [11]

Conociendo que, el proceso de secado en la industria papelera es el área con mayor consumo de vapor [2], es posible hacer un uso eficiente de este recurso y optimizar el proceso de secado, partiendo de un estudio comparativo, donde se parten de balances de energía global, donde solo se toma en cuenta el consumo de vapor; ya que identificando el desempeño energético del proceso, se pueden buscar oportunidades de mejora y aprovechamiento, lo que posteriormente se traducirá, en reducción de costos.

El proceso de secado del papel en PAPELSA S.A. comienza luego de que la lámina formada sale de las prensas con un 49% de contenido seco. La hoja formada viaja por una lona a través de los 45 secadores. Los cilindros se distribuyen en 7 secciones térmicas, donde además de la inyección de vapor en el interior de los secadores, también incluye inyección de aire proveniente de la atmósfera, acondicionado térmicamente de manera previa; con el fin de que se dé la transferencia de masa del agua desde el papel hacia el aire. La inyección del aire se hace en un punto estratégico dependiendo, si es un

secador superior o inferior, para que en el momento en que el agua sea evaporada gracias al calor transferido por el vapor dentro del cilindro, esta pueda migrar al aire y así ser expulsada del sistema, ya que, si esto no ocurre, el agua volvería al papel, dañando las propiedades esperadas del producto terminado o incluso ocasionando problemas de corrosión en los rodillos de la máquina. En la figura 1, puede observarse un esquema donde se puede apreciar la distribución de los secadores y la inyección del aire. Durante el proceso de secado, se espera que el vapor inyectado condense, y es por esto se cuenta con un sistema de 4 separadores flash, en donde se recolectan los condensados de las secciones térmicas. La corriente de condensado del separador 2 y la corriente del vapor flash del separador 1 son usadas para el acondicionamiento térmico del aire que será inyectado al sistema. mientras el vapor flash, excepto el del separador 1, es usado en secciones anteriores para regular la diferencia de presión y luego se dirigen a un sistema de condensado al vacío, llamado vacuum condenser, para posteriormente ir al separador 1. Todos los condensados del separador 1 se dirigen al tanque horizontal, el cual recolecta todos los condensados del sistema luego de que realice el aprovechamiento energético de estas corrientes. Desde el tanque horizontal salen dos corrientes, una hacia la caldera unión y otra hacia los atemperadores, que se encargan del control de temperatura de las líneas de alimentación de vapor.

Luego, el aire caliente que transporta el agua retirada del papel, es usado para precalentar el aire tomado de la atmosfera y que será inyectado en el equipo, en las 3 torres de aerotermia, las cuales están compuestas por ventiladores para la inyección y extracción del aire, además, de intercambiadores de calor. Primero como se mencionó anteriormente, el aire expulsado del sistema se encarga de precalentar el aire tomado desde la atmosfera, luego, el aire pasa a un intercambiador donde su fluido de servicio es el condensado del vapor usado en los cilindros secadores, posteriormente, pasa a otro intercambiador donde se aumenta su temperatura con vapor flash proveniente del separador 1 y por último, si se requiere, se emplea vapor de la línea de alta presión en el último intercambiador para llegar al set point de la temperatura de inyección del aire. [4]. Durante esta operación se debe tener en cuenta que, a mayor temperatura, el aire será capaz de retener más masa de agua. Se debe tener en cuenta que, en un punto apropiado de saturación del aire, este puede contener la mayor cantidad de agua posible, sin que esta se condense y así tener una mayor capacidad de transferir calor al aire que ingresa desde la atmosfera, lo que se traduciría en un menor requerimiento de vapor para terminar de aumentar la temperatura del aire que ingresa a la unidad de secado [1].

Rodillos transportadores de lona

Inyección aire secador Superior



Secador

Inyección aire secador inferior

Lona

Figura 1a. Inyección de aire entre los secadores

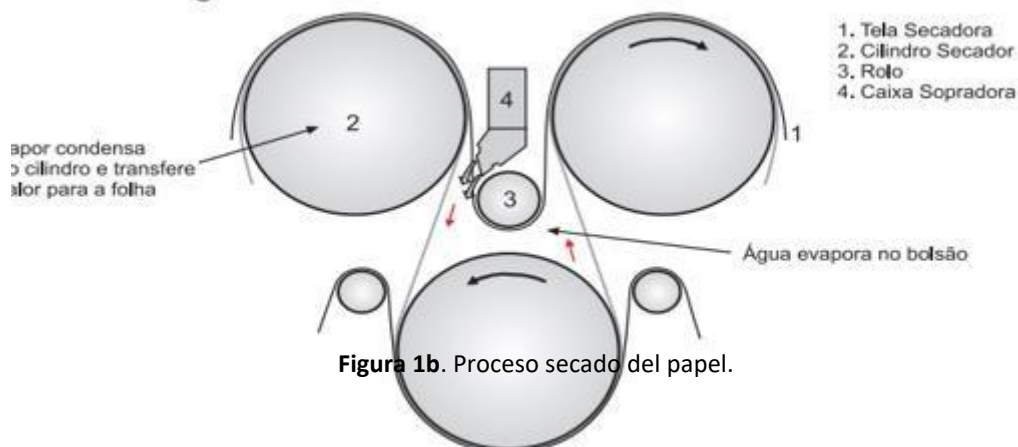


Figura 1b. Proceso secado del papel.

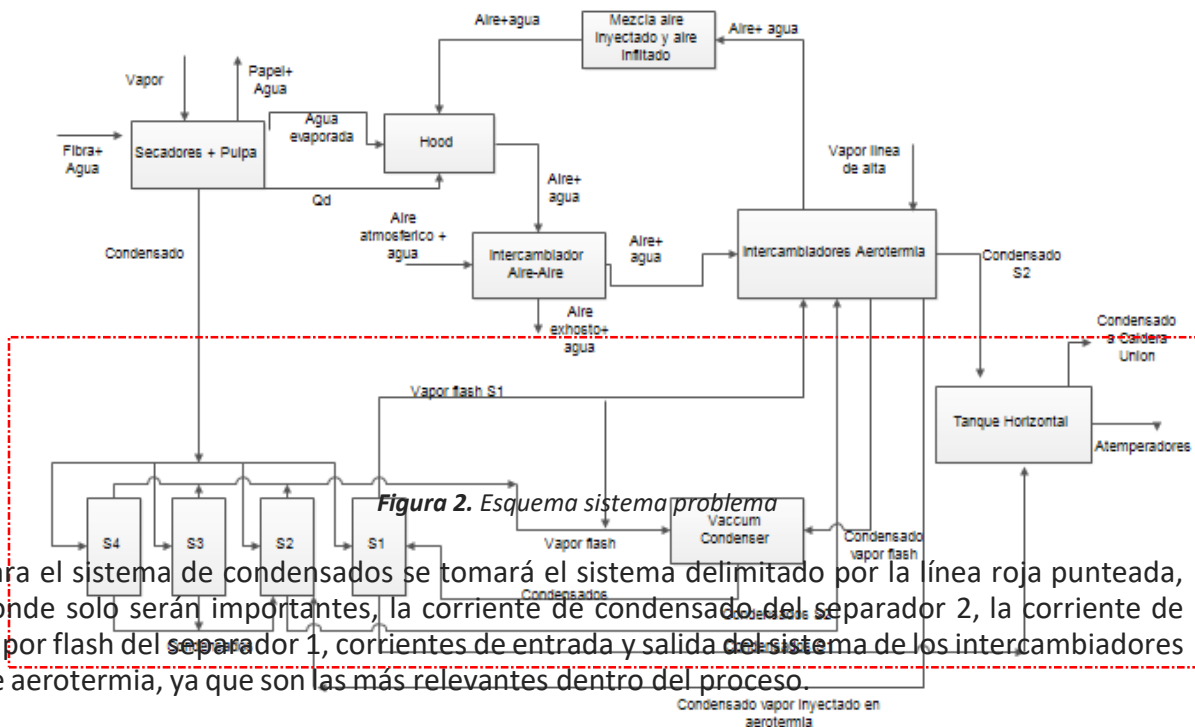
Se cuenta con dos líneas de vapor, una de baja y otra de alta presión que alimentan los secadores, la línea de alta es para la 6 y 7 sección, y la línea de baja para las secciones 1,2,3,4 y 5. Cabe resaltar que a las cajas encargadas de inyectar el aire dentro del proceso se le llaman bolsillos.

El tren de secado cuenta con una coraza donde se da la transferencia de masa entre el papel y el aire, y recibe el nombre de *Hood*. SEGÚN la norma TAPPI, la humedad relativa del aire dentro de la coraza no debe ser superior al 60 % [3]. Bajo las condiciones actuales del proceso, se ha encontrado que, dentro del Hood, el aire presenta humedades relativas entre el 70 -75% y en algunas secciones alcanzan valores superiores, además, una humedad absoluta entre 80-90 kg H₂O/ kg aire, cuando esta puede alcanzar un valor entre 120 y 140 kg H₂O/ kg aire, sin que el agua condense [1]. Cabe resaltar, que el alto valor de humedad relativa ha llevado a que se produzcan condensaciones dentro del Hood y, por consiguiente, se ha generado corrosión en algunos de los rodillos. Por otro lado, para la relación consumo de vapor/agua evaporada, para un sistema de secado con un Hood cerrado y con sistema de recuperación de calor, como el que se cuenta en PAPELSA

S.A. la norma TAPPI establece que un sistema eficiente alcanza un valor de 1.3. En cuanto a la relación inyección/extracción de aire se recomienda un valor óptimo entre 65%-85%. por último, para la humedad absoluta en los bolsillos inyectoros de aire se recomienda que este esté por debajo de 0.200 [9].

Metodología

Como se mencionó anteriormente, el sistema de secado es bastante complejo, por lo cual se decidió abarcar el problema como muestra la siguiente figura, tomando sistemas que abarquen gran número de corrientes y equipos, para luego tomar sistemas más específicos; esta estrategia es ideal para un primer acercamiento debido a que no se tiene información previa sobre la operación de secado luego de la ampliación del molino y mejoras con las torres de aerotermia realizada en el 2017.



Para el sistema de condensados se tomará el sistema delimitado por la línea roja punteada, donde solo serán importantes, la corriente de condensado del separador 2, la corriente de vapor flash del separador 1, corrientes de entrada y salida del sistema de los intercambiadores de aerotermia, ya que son las más relevantes dentro del proceso.

En primera instancia se realizaron mediciones de la humedad para establecer las condiciones actuales del aire dentro del Hood, para posteriormente,

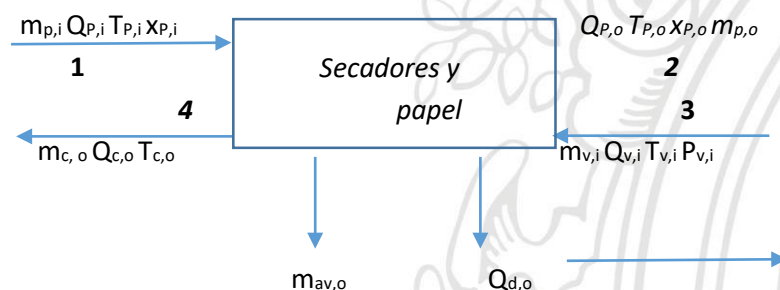
realizar un balance sólo esta parte de la máquina, con el fin de determinar la capacidad actual del sistema de aerotermia.

Con la ayuda de un tubo pitot se establecieron los caudales de inyección en los bolsillos inferiores, caudal de inyección total y el caudal de extracción; para luego mediante un balance de masa establecer el flujo de aire que se dirige hacia los bolsillos inferiores.

Durante estas mediciones se realizaron variaciones en las frecuencias de los ventiladores de inyección y extracción, así como la humedad absoluta del aire a la salida del Hood. Luego, de analizar el balance realizado, bajo el acompañamiento del proveedor Albany International Corp., se procedió a establecer otros puntos para las mediciones con el fin de completar el balance de masa y energía a toda la sección de secado.

Luego, para la solución y especificación de las corrientes del sistema problema mostrado en la figura 1, se procedió a trabajar por sistemas, así:

➤ **Sistema Cilindros secadores y papel**



Donde los subíndices i: in o: out, además,

- m_p : flujo másico de papel a la entrada (kg/s) Q_p : flujo de energía en el papel (kJ/s)
- T_p : temperatura del papel ($^{\circ}\text{C}$) x_p : Fracción másica de papel
- m_v : consumo de vapor (kg/s)
- Q_v : flujo de energía en el vapor consumido (kJ/s) P_v : presión del vapor (Mpa)
- T_v : temperatura del vapor ($^{\circ}\text{C}$) Q_d : calor disipado (kJ/s)
- m_c : flujo másico de condensado (kg/s) T_c : Temperatura del condensado ($^{\circ}\text{C}$)
- Q_c : Flujo de calor en el condensado (kJ/s) m_{av} : flujo másico de agua evaporada (kg/s)

Aquí cabe resaltar que se llama papel a la mezcla de fibra y agua, por lo tanto, las corrientes mencionadas anteriormente con el subíndice "p"

contienen tanto fibra como agua, También, de ahora en adelante se le llamara contenido seco a la fibra.

Además, debe tenerse en cuenta variables como:

- Peso base
- Ancho de la hoja terminada
- Velocidad de la máquina

Ya que estas nos permitirán establecer el flujo total a la salida del tren de secado a las condiciones de operación con la siguiente expresión,

$$m_2 = V * A * PB * \frac{60min}{1h} * \frac{1kg}{100g} \quad [1]$$

Donde,

V: velocidad de la maquina (m/min) A:
ancho de la hoja terminada (m) PB: Peso
base (g/m²)

Al salir del tren de secado el papel aun contiene humedad, y es por ello que, con el valor obtenido en la expresión anterior multiplicado por el contenido seco, nos dará el flujo de fibra a la salida, que se considera constante a lo largo del todo el proceso de secado, es decir, este flujo de fibra es el mismo a la salida de las prensas. Entonces,

$$m_{p,o} = m_2 * X_p^2 \quad [2]$$

X_p^2 : contenido seco en la corriente 2

m_2 : flujo másico en la corriente 2 (a la salida del tren de secado) (kg/h)

$m_{p,o}$: flujo másico de fibra en la corriente 2 (kg/h)

Luego implementando un balance de masa por componente obtenemos que, para conocer el flujo total a la entrada del tren de secado, es decir, la corriente 1 que contiene fibra y agua, es posible determinarse con la siguiente ecuación, partiendo de que el contenido seco (fibra) es constante a lo largo del proceso de secado.

$$m_1 = \frac{m_2}{X_p^1} \quad [3]$$

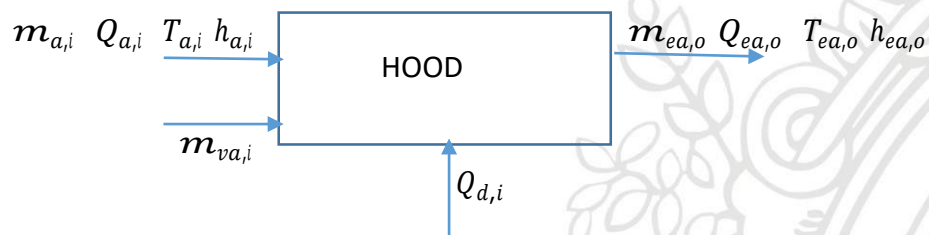
X_p^1 : contenido seco a la salida de las prensas (0.49)

m_1 : flujo másico total a la entrada del tren de secado.

Luego, de implementar un balance de masa, se pudo establecer la siguiente ecuación para especificar el flujo másico de agua evaporada a lo largo del tren de secado, sabiendo que el contenido de fibra permanece constante a lo largo del tren de secado.

$$m_{va} = m_1 - m_2 \quad [4]$$

➤ Sistema HOOD



Donde i: in y o: out, además,

m_a : flujo másico de aire inyectado (kg/s)

Q_a : Flujo de calor en el aire (kJ/s)

T_a : Temperatura de inyección (°C)

h_a : humedad absoluta del aire inyectado (kg agua/kg de aire)

m_{va} : flujo másico de agua evaporada (kg/s)

m_{ea} : flujo másico de aire exosto (kg/s)

Q_{ea} : flujo de calor en el aire exosto (kJ/s)

T_{ea} : Temperatura del aire exosto (°C)

h_{ea} : humedad absoluta del aire exosto (kg agua/kg aire)

$Q_{d,i}$: Calor disipado por el sistema papel-secadores que entra al Hood (kJ/s)

Los flujos de inyección y extracción del Hood se midieron con ayuda de un tubo pitot y las temperaturas del aire determinadas con un higrómetro. Para las demás propiedades se emplearon las siguientes ecuaciones.

$$PV = mRT \quad [5]$$

Donde

M: es el flujo másico de aire (kg/h)

Para determinar la humedad absoluta del aire tenemos que

$$p_v = \exp\left(11.78 \frac{T_{bh} - 99.64}{T_{bh} + 230}\right) \quad [6]$$

$$X_v = 0.62197 \left(\frac{p_v}{p - p_v}\right) \quad [7]$$

$$X = \frac{1.0048 * (T_{bh} - T_{bs}) + X_v(2501 - 2.3237T_{bh})}{2501 + 1.86T_{bs} - 4.19T_{bh}} * 1000 \quad [8]$$

Donde,

T_{bh} : Temperatura de bulbo húmedo (°C)

p : Presión atmosférica (bar)

T_{bs} : Temperatura de bulbo seco (°C)

X : humedad absoluta (g H₂O/kg Aire seco)

X_v : Fracción parcial

p_v : Presión parcial de vapor de agua en el aire(bar)

Para conocer la humedad relativa,

$$p_{pv} = \exp\left(11.78 \frac{T_{bs} - 99.64}{T_{bs} + 230}\right) \quad [9]$$

$$X_{pv} = 0.62197 \left(\frac{p_{pv}}{p - p_{pv}}\right) \quad [10]$$

$$X_r = \frac{X_v}{X_{pv}} \quad [11]$$

Donde,

p_{pv} : Presión parcial de vapor de agua en el aire(bar)

p : Presión atmosférica (bar)

X_{pv} : Fracción parcial de vapor

X_v : Fracción parcial

X_r : humedad relativa (%)

Para determinar el punto de rocío

$$P_p = X \frac{p}{(X + 0.6222)} \quad [12]$$

$$T_{dp} = 99,64 + 329.64 \frac{L(P_p)}{11.78 - \ln(P_p)} \quad [13]$$

Donde,

T_{dp} : Temperatura en el punto de rocío (°C)

p : Presión atmosférica (bar)

X : humedad absoluta (kg H₂O/kg Aire seco)

P_p : Presión parcial (bar)

Finalmente, para determinar la densidad den aire tenemos que,

$$\rho = \frac{216.67 P(X + 1)}{(273.15 + T_{bs})(X + 0.622)} \quad [14]$$

Donde,

ρ : Densidad del aire kg/m³

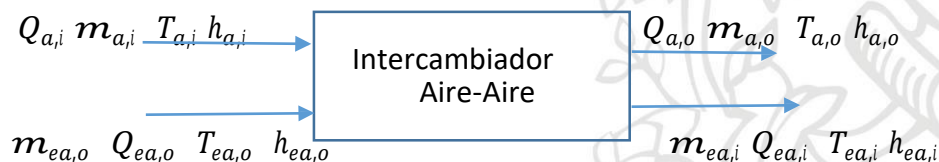
P : Presión (bar)

X : humedad absoluta (kg H₂O/kg Aire seco)

T_{bs} : Temperatura de bulbo seco (°C)

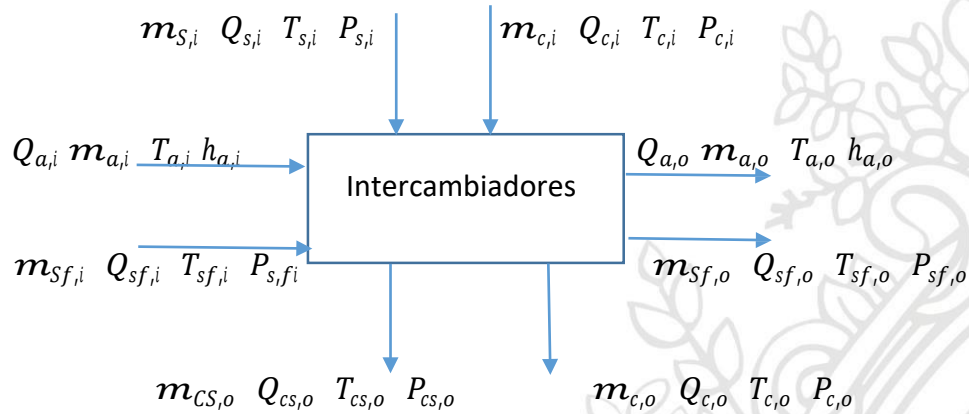
Para el sistema de recuperación energética, compuesto por tres torres de aerotermia, las cuales se encargan de acondicionar térmicamente el aire inyectado en el proceso. Estas torres tienen incorporados intercambiadores de calor donde los fluidos de trabajo son, aire expulsado del proceso, condensado, vapor flash y vapor de la línea de alta presión, donde el aire tomado desde la atmosfera atraviesa el sistema en el orden mencionado anteriormente. Se decidió trabajarlo como un sistema para el intercambiador aire-aire y otro sistema donde se incluyen los otros tres intercambiadores.

➤ Intercambiador de calor Aire-Aire



Donde, i: in y o: out.

➤ Intercambiadores de calor condensado, vapor flash y vapor línea de alta presión



Donde,

m_{Sf} : flujo másico de vapor flash proveniente del separador 1 (kg/h)

m_c : flujo másico de condensado proveniente del separador 2 (kg/h)

m_S : flujo másico de vapor proveniente de la línea de alta (kg/h)

m_{CS} : flujo másico de condensado del vapor inyectado desde la línea de alta presión (kg/h)

m_a : Flujo másico de aire (kg/h)

i: in y o: out.

Adicionalmente, para especificar el flujo de la corriente de vapor inyectado, se emplearán las propiedades de fábrica de la válvula neumática, las cuales pueden observarse en el anexo 2, encargada de controlar el flujo de inyección del vapor desde la línea de alta presión, tales como C_v , caída de presión, para que con la siguiente ecuación sea posible estimar el flujo a través de la válvula SEGÚN su porcentaje de apertura. Como se cuenta con 3 torres, las cuales cuenta con 3 válvulas idénticas, lo que se hace para establecer el flujo total, es identificar el flujo por cada válvula con la siguiente expresión, para posteriormente sumarlos.

$$f = C \frac{X}{v} \sqrt{\frac{\Delta P}{GS}} * 0.4535 \quad [15]$$

Donde,

f : Flujo de vapor alimentado en aeroterapia (kg/h)

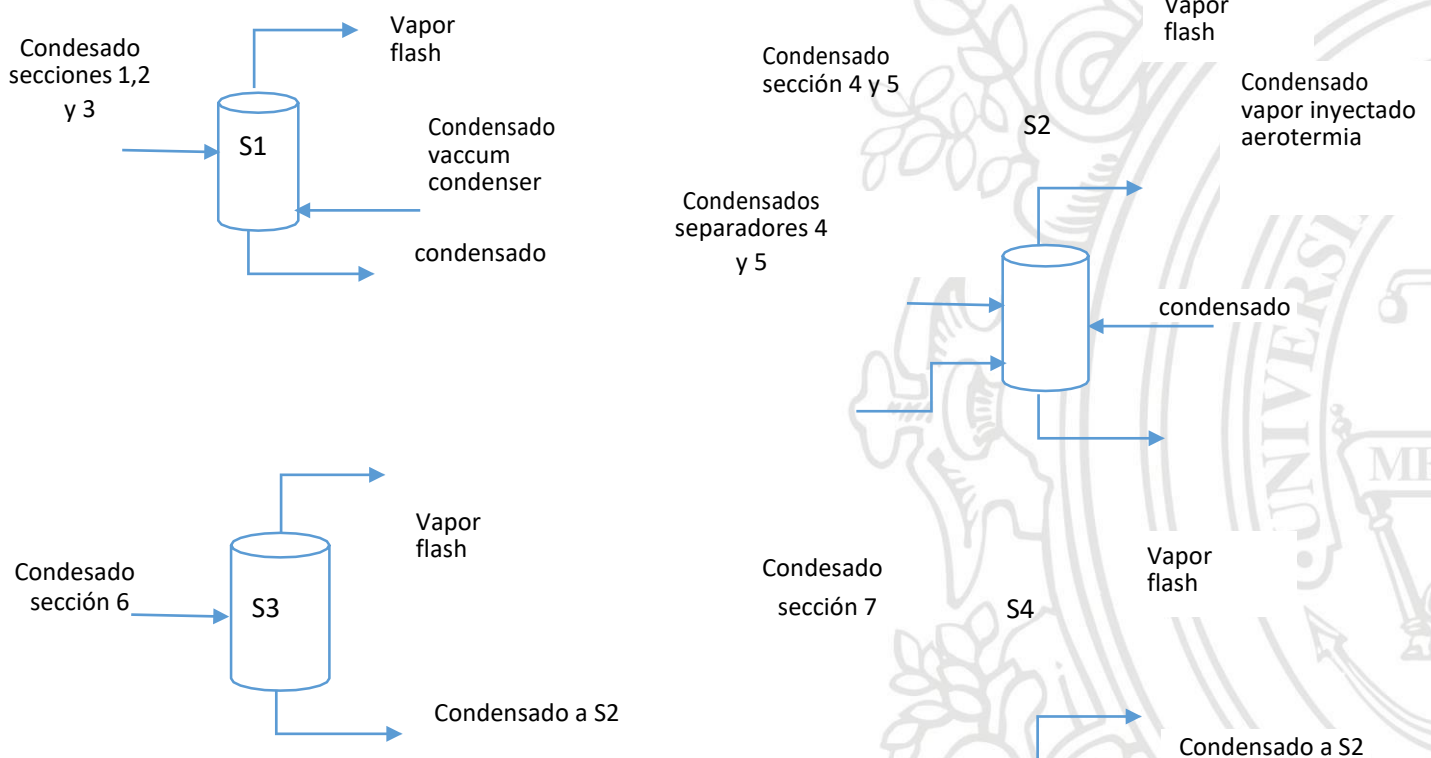
C_v : Coeficiente de caudal de la válvula ((Lb/h)/ $\sqrt{\text{bar}}$)

X : porcentaje de apertura de la válvula

ΔP : caída de presión en la válvula (bar)

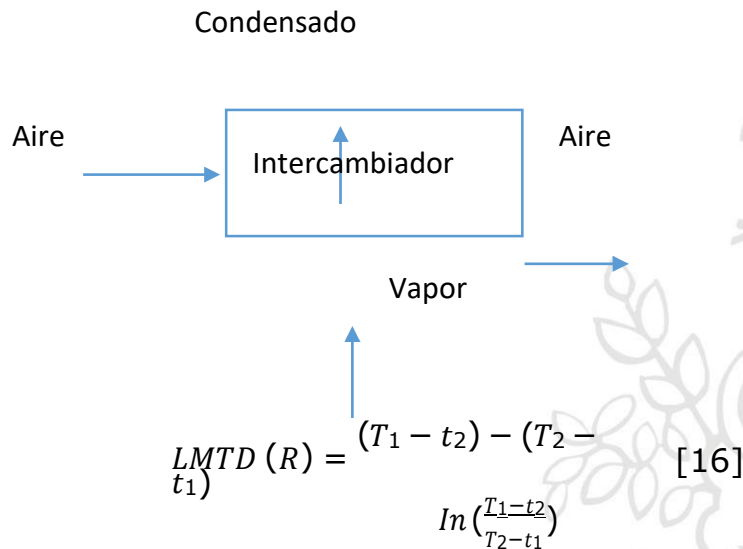
GS: gravedad específica del fluido a través de la válvula a las condiciones del proceso.

Para la medición de las corrientes de condensado y vapor en los separadores flash, se empleó el procedimiento descrito por la norma TAPPI [11] el cual puede observarse con detalle en el anexo 1, y así se especificarán las corrientes de entrada y salida de condensado y vapor flash a ese sistema de intercambiadores. A continuación, se podrá observar un esquema de los separadores y se ilustrarán las corrientes que se pretenden determinar con este procedimiento.



Con el procedimiento, se especificaron las corrientes de condensado a la salida de los separadores. Por otro lado, como se mostró en la figura 2, se estudiará el sistema delimitado por la línea roja punteada, donde solo se buscó conocer las corrientes de condensado de los separadores, corriente de vapor condensado inyectado en aeroterapia, que corresponde a una de las entradas del separador 2 y finalmente, la corriente de vapor flash a la salida del separador 1. Ya que, estas corrientes son importantes para el proceso de

acondicionamiento térmico del aire en las torres de aerotermia y resultan más relevantes en este momento. Para la especificación de la corriente de vapor flash que ingresa a las torres se tomara este intercambiador como sistema adicional así:



$$Q = U * A * LMTD \quad [17]$$

Donde, 1: entrada, 2: salida

T: temperatura del fluido caliente (Vapor) (°R) t: temperatura del fluido frío (aire) (°R)

U: coeficiente total el cuales tomado de la tabla 8 den apéndice SEGÚN el tipo de fluidos ((Kern, 1999)

A: área de transferencia de calor (ft²) el cual esta especificada en los manuales.

Luego de conocer las variables con las ecuaciones anteriores, planteando un balance de energía solo para el vapor flash podremos conocer el flujo de vapor flash que ingresa a las torres.

$$m_{sf}^1 = \frac{Q}{h_1 - h_2} \quad [18]$$

Donde,

m_{sf}^1 : vapor flash que ingresa a las torres de aerotermia (kg/h)

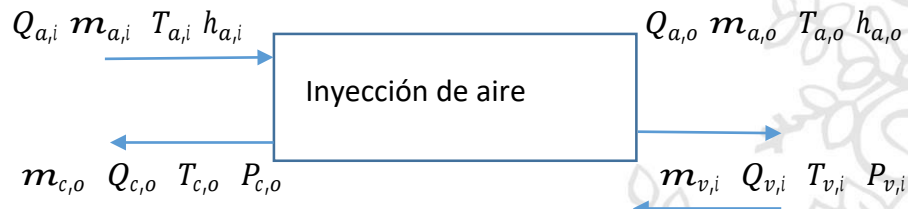
h_1 : entalpia del vapor a la entrada (kJ/kg)

h_2 : entalpia del condensado a la salida (kJ/kg)

Q : calor transferido(kJ/h)

Cabe resaltar que aire que ingresa al este intercambiador es el aire que sale del intercambiador aire –aire.

➤ Sistema de inyección de aire



Donde i: in y o: out

Adicionalmente, para el balance de energía se plantea el siguiente modelo matemático.

$$Q_p = m_p * (x_p * C_f) + (1 - x_p) * C_w * T \quad [16]$$

$$Q_c = m_c C_p(T) \quad [17]$$

$$Q_d = m_f C_f(T) + m_v C_v(T) - m_c C_c(T) \quad [18]$$

$$Q_a = m_a(1.01 + 1.88h) * T + 2490h \quad [19]$$

Donde,

Q_a : flujo de energía en el aire

H: humedad en el aire (g H₂O/kg Aire seco)

Q_d : calor disipado(kJ/s)

Q_p : flujo de energía en el papel (kJ/s)

Q_c : flujo de energía en el condensado (kJ/s)

C_f : capacidad calorífica de la fibra (kJ/kg)

C_v : capacidad calorífica del vapor (kJ/kg)

C_c : Capacidad calorífica del condensado (kJ/kg)

C_w : capacidad calorífica del agua (kJ/kg)

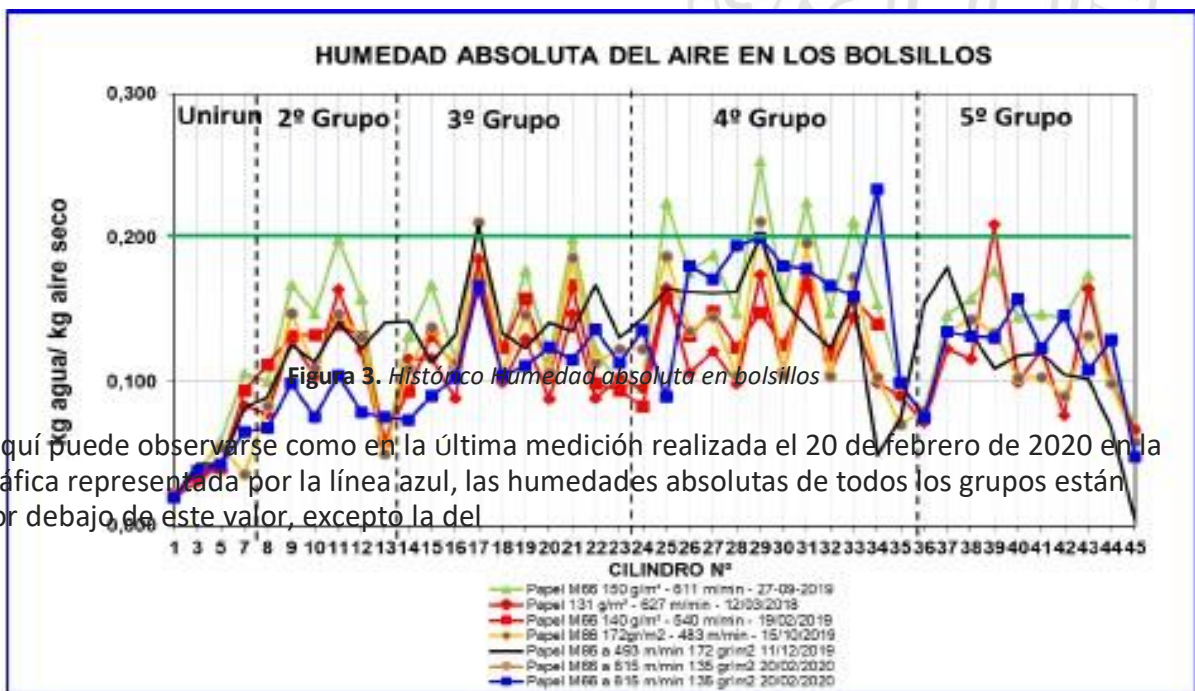
x_p : Fracción másica de papel T:
temperatura (°C)

Cabe resaltar que la ecuación 17 se adecua al estado de agregación del agua SEGÚN se requiera.

Resultados y análisis

Como se mencionó en la metodología, primero se partió por realizar mediciones de la temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo del aire dentro del Hood, con ayuda de higrómetro. A continuación, se observarán los resultados obtenidos de las mediciones de dichas temperaturas, con las cuales se determinaron la humedad absoluta y la humedad relativa del aire en el tren de secado realizadas.

Aquí pueden observarse mediciones previas realizadas por la empresa Albany International Corp, proveedor encargado de suministrar las vestiduras de la máquina, y quienes se encuentran realizando un estudio de valor agregado a la materia prima que proveen en PAPELSA S.A. En la figura 3, podrá observarse el histórico de la humedad absoluta en los bolsillos inyectoros de aire. La grafica está dividida por secciones mecánicas, es por ello que allí se podrá apreciar 5 grupos. Como se mencionó anteriormente, la norma TAPPI establece que para el tipo de HOOD y sistema de recuperación energética empelado en PAPELSA S.A., la humedad absoluta en los bolsillos inyectoros no debe superar el 0.2 kg H₂O/kg de aire seco [9] y es por eso que allí se aprecia una línea verde que delimita este valor en la gráfica.



secador 34 y 17, por lo cual se recomendó hacer una revisión de los dampers correspondientes de estos bolsillos.

Ahora en la figura 4, se puede apreciar el histórico de las humedades relativas en las 5 secciones del tren de secado, donde se puede ver que la última fue realizada el 20 de febrero del presente año, donde notablemente se aprecia una reducción en las humedades relativas de todos los grupos.

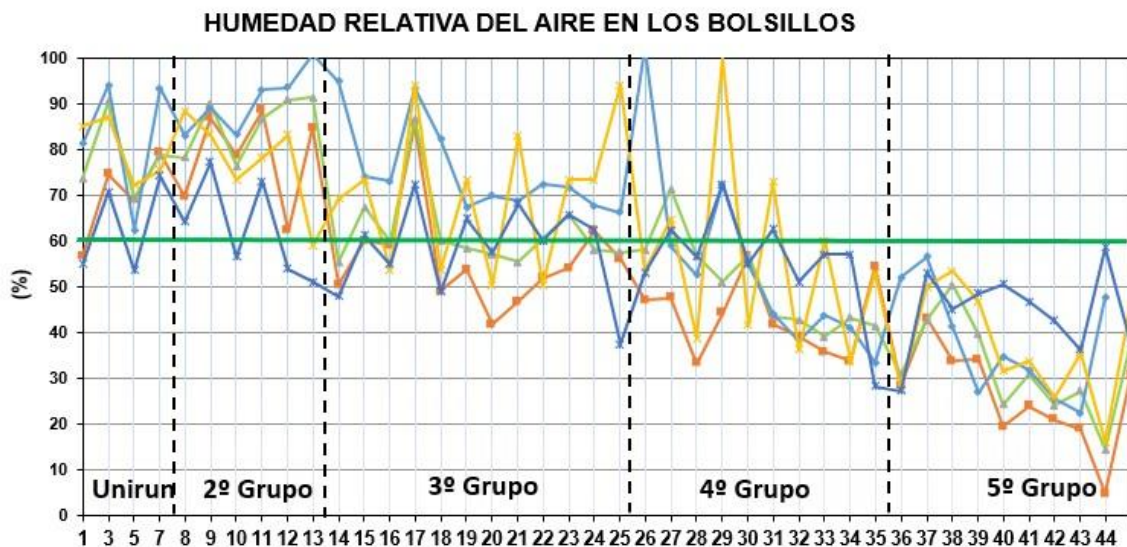


Figura 4. Histórica humedad relativa en bolsillos

- Papel M86 a 499 m/min 172 gr/m² 12/12/2019-3
- Papel M86 a 499 m/min 172 gr/m² 13/12/2019-3
- Papel M86 a 499 m/min 172 gr/m² 11/12/2019
- Papel M66 a 6.15 m/min 135 gr/m² 20/02/2020

Con Los resultados obtenidos en el mes de diciembre se plantearon realizar la restricción de los dampers de la cuarta y quinta sección, pues se observó como la humedad relativa en estas estaba por debajo de 60%, para favorecer al flujo de aire inyectado dirigirse hacia las primeras secciones y así ayudar a que el agua evaporada en estas secciones sea eliminada con el aire. además, se modificó la temperatura de inyección del aire, paso de 95°C a 85°; ya que, es una recomendación según la norma TAPPI para el sistema disponible, además, sabiendo que con una menor temperatura se tendrá una mayor cantidad de flujo másico de aire, pues, como sabemos a mayor temperatura el aire se expandirá, pero esto a su vez implica menos masa de aire.

Con estos movimientos se evidencio una gran reducción en las humedades relativas de las primeras secciones, que es donde el problema es más notorio, como puede evidenciarse tanto en la figura 3, comparando la línea amarilla

correspondiente al mes de diciembre, con respecto a la línea azul oscura la cual corresponde al mes de febrero. así que actualmente el sistema se encuentra operando con humedades relativas muy cercanas o incluso por debajo del 60%; excepto los bolsillos 3,7,9,11,17 y 29, por lo cual se recomienda hacer inspección de los dampers correspondientes de estos bolsillos.

Cabe resaltar, que se tardó en volver a medir estas propiedades, de diciembre a febrero, debido a dificultades presentadas con el equipo, pues estuvo en reparación desde el mes de diciembre, pero el problema persistió hasta que pudo ser calibrado y reparado hasta el mes de febrero.

A continuación, en las tablas 1 y 2, se mostrarán los resultados obtenidos en el balance del HOOD, el cual se realizó en compañía del proveedor Albany International Corp.

Tabla 1. Resultados flujos inyección y extracción Hood (Albany International Corp)

| Inyección | Bulbo Seco °C | Bulbo Húmedo °C | Humedad Absoluta g H ₂ O/kg de Aire Seco | Flujo Total Aire | | Flujo Total | |
|-------------------|------------------|--------------------|--|--------------------|-------------------|-------------------------------|---------------------------|
| | | | | Nm ³ /h | m ³ /h | Agua kg H ₂ O/h | Aire Seco kg de Aire/h |
| Inyección 1 - Sup | 79 | 30 | 7 | 14.648 | 17.903 | 122 | 17.871 |
| Inyección 1 - Inf | 79 | 30 | 7 | 8.398 | 10.264 | 70 | 10.246 |
| Inyección 2 - Sup | 82 | 32 | 10 | 15.166 | 18.694 | 179 | 18.471 |
| Inyección 2 - Inf | 82 | 32 | 10 | 8.327 | 10.264 | 98 | 10.142 |
| Inyección 3 - Sup | 82 | 31 | 8 | 6.387 | 7.873 | 59 | 7.789 |
| Inyección 3 - Inf | 82 | 31 | 8 | 9.993 | 12.317 | 93 | 12.185 |
| TOTAL: | | | | 62.919 | 77.316 | 622 | 76.703 |

Tabla 2. Comparativo de flujos medidos y flujos nominales establecidos al inicio del proyecto (Albany International Corp)

| Extracción | Bulbo Seco °C | Bulbo Húmedo °C | Humedad Absoluta g H ₂ O/kg de Aire Seco | Flujo Total Aire | | Flujo Total | |
|---------------|------------------|--------------------|--|--------------------|-------------------|-------------------------------|---------------------------|
| | | | | Nm ³ /h | m ³ /h | Agua kg H ₂ O/h | Aire Seco kg de Aire/h |
| Extracción 1 | 75 | 52 | 79 | 33.178 | 40.090 | 3.326 | 38.782 |
| Extracción 2 | 76 | 53 | 91 | 47.342 | 57.370 | 5.039 | 55.190 |
| Extracción 3 | 78 | 54 | 97 | 28.735 | 35.021 | 3.230 | 33.412 |
| TOTAL: | | | | 109.255 | 132.480 | 11.595 | 127.383 |

| | Posición | Flujo Nominal | Flujo 13/03/2018 | Flujo 19/02/2019 | Flujo 26/09/2019 | Flujo 25/02/2020 | % Capacidad 25/02/2020 |
|--------------------|-------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------|
| 50 Hz | Inyección 1 | 54.893 Nm ³ /h | 25.111 Nm ³ /h | 21.845 Nm ³ /h | 30.489 Nm ³ /h | 23.046 Nm ³ /h | 42% |
| 50 Hz | Inyección 2 | 54.893 Nm ³ /h | 26.041 Nm ³ /h | 23.328 Nm ³ /h | 4.539 Nm ³ /h | 23.493 Nm ³ /h | 43% |
| 50 Hz | Inyección 3 | 37.445 Nm ³ /h | 18.230 Nm ³ /h | 16.429 Nm ³ /h | 23.080 Nm ³ /h | 16.380 Nm ³ /h | 44% |
| Flujo Total | | 109.786 Nm³/h | 69.381 Nm³/h | 61.602 Nm³/h | 58.107 Nm³/h | 62.919 Nm³/h | |

| | Posición | Flujo Nominal | Flujo 13/03/2018 | Flujo 19/02/2019 | Flujo 26/09/2019 | Flujo 25/02/2020 | % Capacidad 25/02/2020 |
|--------------------|--------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|------------------------|
| 60 Hz | Extracción 1 | 68.377 Nm ³ /h | 49.910 Nm ³ /h | 50.345 Nm ³ /h | 40.731 Nm ³ /h | 31.104 Nm ³ /h | 45% |
| 60 Hz | Extracción 2 | 68.377 Nm ³ /h | 54.081 Nm ³ /h | 54.081 Nm ³ /h | 51.482 Nm ³ /h | 39.475 Nm ³ /h | 58% |
| 60 Hz | Extracción 3 | 46.643 Nm ³ /h | 30.214 Nm ³ /h | 30.214 Nm ³ /h | 31.361 Nm ³ /h | 26.468 Nm ³ /h | 57% |
| Flujo Total | | 183.397 Nm³/h | 134.205 Nm³/h | 134.640 Nm³/h | 123.574 Nm³/h | 97.046 Nm³/h | |

| | | | | | |
|-------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Balanceo Nominal | 60% | 52% | 46% | 47% | 65% |
|-------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|

Con los resultados obtenidos en las tablas 1 y 2, se puede observar como el flujo de inyección 1 y 2, tiene preferencia por los bolsillos superiores, mientras que la inyección 3 presento preferencia por los bolsillos inferiores. Además, se apreció como las humedades absolutas en los flujos de inyección son bajas, y están dentro de lo recomendado que es un valor de 29 g H₂O/kg de aire seco. Mientras que se esperaba y lo ideal es que las humedades del aire extraído se encuentren en un rango entre 150-170 g H₂O/kg de aire seco, se observó que los valores están por debajo de 100 g H₂O/kg de aire seco.

Finalmente, en la siguiente tabla se apreciará un histórico de los valores nominales de los flujos de inyección y extracción de aire, desde que se realizó la ampliación del molino, respecto a los valores teóricos dados. Donde, se esperaba que el balance nominal se encuentre entre un 65-85% respecto a los valores dados en la entrega del proyecto, y SEGÚN los resultados obtenidos, el balance se encuentra dentro de un 60%, lo que pone al sistema en un buen lugar, indicando que se pueden seguir realizando mejores, hasta poder llevarlo a un punto óptimo de operación.

Tabla 3. Comparativas mediciones de flujos respecto a valores del proyecto

| | Posición | Flujo Nominal | Flujo 13/03/2018 | Flujo 19/02/2019 | Flujo 26/09/2019 | Flujo 25/02/2020 | % Capacidad 25/02/2020 |
|-------|--------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------|
| 50 Hz | Inyección 1 | 54.893 Nm ³ /h | 25.111 Nm ³ /h | 21.845 Nm ³ /h | 30.489 Nm ³ /h | 23.046 Nm ³ /h | 42% |
| 50 Hz | Inyección 2 | 54.893 Nm ³ /h | 26.041 Nm ³ /h | 23.328 Nm ³ /h | 4.539 Nm ³ /h | 23.493 Nm ³ /h | 43% |
| 50 Hz | Inyección 3 | 37.445 Nm ³ /h | 18.230 Nm ³ /h | 16.429 Nm ³ /h | 23.080 Nm ³ /h | 16.380 Nm ³ /h | 44% |
| | Flujo Total | 109.786 Nm³/h | 69.381 Nm³/h | 61.602 Nm³/h | 58.107 Nm³/h | 62.919 Nm³/h | |

Con los resultados obtenidos en el balance del Hood, se pudo observar como a pesar de haber restringido en los dampers de inyección superiores, el flujo de aire sigue teniendo preferencia por irse por el ducto superior en los tres ductos. Además, se establece la posibilidad de que esto sea debido a que la lona tenga taponamientos debido a stickies, y esto no este permitiendo que el flujo de aire pase por a través de la esta y luego por el papel, para así arrastrar el agua evaporada. También se plantea la posibilidad de que, en alguna de las secciones térmicas de secado, la lona no cuente con la permeabilidad y apertura requerida, en la figura 5 puede apreciarse las permeabilidades recomendadas SEGÚN la sección de secado, el gramaje de papel producido y la velocidad de la máquina. Por ello, se recomienda realizar otro balance en este sistema luego de que se instalen las nuevas lonas

| | Posición | Flujo Nominal | Flujo 13/03/2018 | Flujo 19/02/2019 | Flujo 26/09/2019 | Flujo 25/02/2020 | % Capacidad |
|-------|-------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------|
| 60 Hz | Extracción 1 | 86.877 Nm ³ /h | 49.619 Nm ³ /h | 59.045 Nm ³ /h | 48.881 Nm ³ /h | 68.624 Nm ³ /h | 79% |
| 60 Hz | Extracción 2 | 68.377 Nm ³ /h | 54.081 Nm ³ /h | 54.081 Nm ³ /h | 51.482 Nm ³ /h | 39.475 Nm ³ /h | 58% |
| 60 Hz | Extracción 3 | 45.225 Nm ³ /h | 32.206 Nm ³ /h | 32.206 Nm ³ /h | 32.211 Nm ³ /h | 28.854 Nm ³ /h | 64% |
| | Flujo Total | 190.479 Nm³/h | 135.906 Nm³/h | 145.332 Nm³/h | 132.574 Nm³/h | 136.953 Nm³/h | |
| | Balanceo Nominal | | 60% | 52% | 46% | 47% | 65% |

Albany, ya que estas cuentan con mayor resistencia a la contaminación y mayor permeabilidad. También, se recomendó el verificar que las resistencias de las lonas coincidan con la recomendada para cada sección de la máquina.

PERMEABILIDADE DE TELAS em CFM

| | | | | |
|----------|----------|----------|-------|-------|
| 1 ST | 2 ST | 3 ST | 4 S/I | 5 S/I |
| 80 - 100 | 80 - 100 | 80 - 100 | 150 | 200 |

Papel Jornal 45 g/m² - 1.000 – 1.500 m/min, componentes auxiliares

| | | | | | | |
|------|-------|-------|-------|------------|-------|-------|
| 1 MT | 2 S/I | 3 S/I | 4 S/I | Aplicadora | 5 S/I | 6 S/I |
| 50 | 175 | 300 | 300 | - | 200 | 300 |

Papel Fino 80 g/m² - < 900 m/min, sem componentes auxiliares

| | | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|------------|-------|------------|-------|-------|
| 1 S/I | 2 S/I | 3 S/I | 4 S/I | Aplicadora | 5 S/I | Aplicadora | 6 S/I | 7 S/I |
| 275 | 440 | 800 | 800 | 275 | 275 | 275 | 275 | 800 |

Papel Cartão 220 g/m² - 300 m/min ST – Single Tier

Figura 5. Permeabilidades de la lona según tipo de papel y velocidad de la máquina.

Luego, se comenzó por especificar cada uno de los sistemas planteados en la metodología, partiendo por el sistema de papel y cilindros. Se decidió realizar las mediciones durante la producción de corrugado medio 86 (CM86), ya que este papel es el que implica mayor consumo de vapor, así que las mediciones de los flujos de condensado en el sistema de separadores flash y demás variables se hizo en simultáneo. Se aseguró que la máquina estaba operando bajo estado estacionario, ya que las mediciones se realizaron un día en el que la máquina no había presentado fallas ni había estado parada las últimas 24 horas, además, por cuestiones de seguridad, se realizaron en las horas de la mañana para evitar riesgos con la exposición a altas temperaturas, ya que estas aumentan en las horas de la tarde.

En la siguiente tabla se puede apreciar los valores obtenidos para las corrientes del sistema cilindros papel.

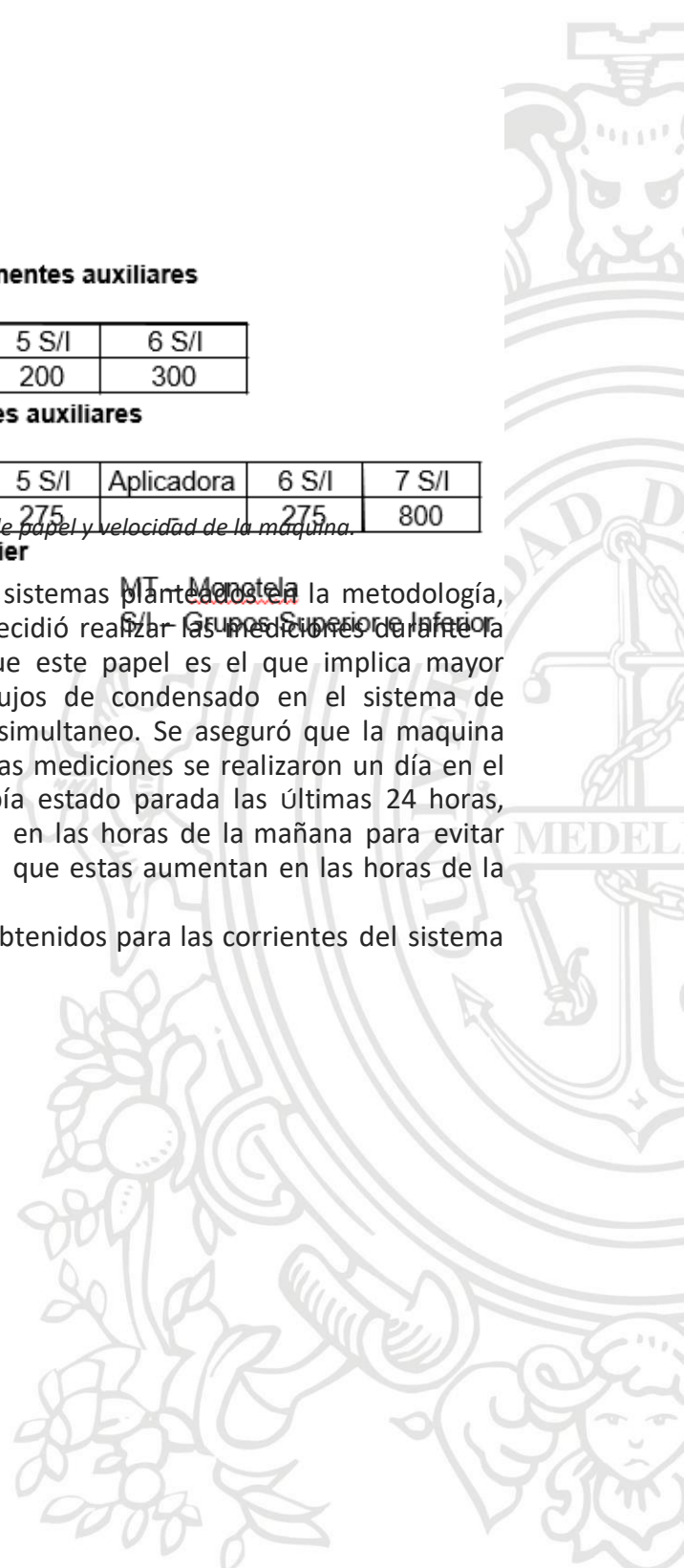


Tabla 4. Variables para el sistema cilindros- papel

| | |
|-----------------------------------|-------|
| V(m/min) | 500 |
| Prod(Ton/h) | 15,9 |
| Peso base(g/m²) | 165,4 |
| %humedad a la salida | 7,5 |
| Vapor rentech(Lb/h) | 29171 |
| Vapor Union (Lb/h) | 28066 |
| Total vapor (Lb/h) | 57237 |
| Xp1 | 0,49 |
| Xp2 | 0,925 |

Después, empleando las ecuaciones de la 1 a la 4, se especificaron las corrientes de a la entrada y la salida (fibra+ agua), agua evaporada a lo largo del tren de secado, como puede observarse en la tabla 4.

Tabla 5. Corrientes del sistema cilindros-papel

| | |
|--|------------|
| Flujo total a la salida secado(kg/h) | 15729,54 |
| Flujo fibra a la salida (kg/h) | 14549,8245 |
| Flujo total a la entrada secado(kg/h) | 29693,5194 |
| Agua evaporada en secado(kg/h) | 13963,9794 |

En este sistema se asume que todo el vapor que ingresa al sistema condensa y que no se presenta acumulación en ninguna de las líneas.

Ahora, para el sistema de condensado, se siguieron los lineamientos planteados en el procedimiento recomendado por la norma TAPPI [11]. A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos para los flujos de condensado en los separadores 1 y 2; pues se observó cierta particularidad en los separadores 3 y 4, que será descrita más adelante. Se especifica aquí el flujo de vapor inyectado en las torres de aerotermia determinado, ya que se asume que este condensa totalmente y no se presenta acumulación en el sistema, y, por lo tanto, este flujo de vapor inyectado es igual al flujo de condensado en la entrada del separador 2.

Tabla 6. Flujos de condensado en separadores 1 y 2

| | |
|---|------------|
| Flujo condensado S1 (kg/h) | 1703,45959 |
| Flujo condensado S2 (kg/h) | 16695,9728 |
| Flujo total vapor en aerotermia (kg/h) | 2706,91503 |

Tabla 7. Propiedades válvulas neumáticas inyección de vapor aerotermia

| | |
|---|------|
| Cv(Lbh/√bar) | 58 |
| T Vap iny aerotermia (°C) | 148 |
| P vap inyectado aerotermia (Bar) | 4,34 |
| Delta P en válvula (bar) | 0,6 |

(ver anexo 2)

No fue posible especificar la corriente de vapor flash que entra a las torres de aerotermia, ya que, se requería realizar intervención mecánica en dichas torres, con el fin de conocer la temperatura del aire antes y después del intercambiador que emplea este fluido de servicio, para así hallar dicho flujo la ecuación (18). Dicha intervención no fue posible realizarla, ya que en los últimos días se presentó la contingencia debido al coronavirus, y esto llevo a que se redujeran las tareas y personal en la última parada de mantenimiento, que era donde se pretendía realizar la tarea. Aun así, con los valores determinados para los flujos y con la ecuación se podría especificar completamente el sistema de los intercambiadores y posteriormente analizar cuál es el porcentaje de cierre del balance.

Por otro lado, durante la determinación de los flujos de condensado en el sistema de separadores flash, se pudo apreciar como en los separadores 3 y 4, de las secciones 6 y 7, respectivamente, no presentaban flujo de condensado, ya que las bombas permanecían apagadas durante la operación, además, para observar el aumento en el nivel del separador, se requirió cerrar la válvula neumática encargada de manipular el flujo de vapor a la salida de la unidad. Esto quiere decir, que el vapor inyectado desde la caldera a las secciones 6 y 7 de secado, no condensa al atravesar los cilindros secadores. Que el vapor no condense, como se espera en estas últimas secciones, indica que el poder energético de este está siendo desaprovechado, pues la capacidad de energía que el vapor puede transferir es menor comparada con la transferida por el condensado, debido a la capacidad diferencia en la capacidad calorífica del agua cuando se encuentra en una fase o en la otra.

Entonces, se determinó que lo ideal es llevar al vapor de la línea de alta presión a unas condiciones de temperatura que le permita llegar al estado de saturación luego de su paso por los cilindros secadores, esto puede ser posible, reduciendo la temperatura del vapor en esta línea. Ya que esto permitirá que el agua en su fase líquida pueda transmitir mayor energía, mejorando el secado del papel en la parte final del tren de secado, lo que podría permitir aumentar la velocidad de la máquina. Entonces, al tener más cantidad de energía disponible se va a requerir un menor flujo de vapor, lo que se traduce en un ahorro en costos, ya que no sería necesario que las calderas produjeran

la misma cantidad de vapor. Adicionalmente, se sugiere que antes de evaluar esta posible modificación, inspeccionar los atemperadores encargados del control de temperatura de las líneas de alimentación de vapor.

Por último, para el intercambiador aire-aire, se tomaron como flujos y condiciones los especificados en el estudio realizado con Albany internacional Copr., ya que todas las mediciones se hicieron en simultaneo. Estos flujos pueden apreciarse en las tablas 1 y 2.

Como visión general, se observa que el sistema de secado en conjunto con la línea de aerotermia en PAPELSA S.A. presenta un gran potencial de trabajo, el cual no está siendo aprovechado. Se sugiere continuar con estudios y balances que permitan evaluar cada vez más de cerca y al detalle los pequeños sistemas que componen el complejo proceso de secado del papel, pues, esto ayudará a identificar posibles condiciones de mejora que permitirán poco a poco alcanzar el punto óptimo de operación; pues contando con el molino más moderno del país, tienen todas las herramientas para continuar innovando y compitiendo en el mercado de soluciones de empaques sostenibles.

A pesar de que no se alcanzaron los objetivos planteados debido a dificultades presentadas durante el desarrollo del proyecto, tales como daños en uno de los equipos de medición, inconvenientes de último momento que no permitieron el cierre completo del balance, se observa que fue un gran acercamiento, ya que, se desconocía por completo las condiciones actuales del proceso de secado durante la producción de papel. Se recomienda que, usando las expresiones aquí planteadas para el balance de masa apenas puedan conocerse las variables pendientes, este se integre con el balance de energía aquí planteado; teniendo cuenta que puede ser necesario el establecer nuevos sistemas para obtener mayor coherencia en los resultados y así, tener un panorama más claro en cuanto a las condiciones y características de operación actuales del tren de secado.

Conclusiones

- el seguimiento y análisis realizado a las humedades del aire dentro del HOOD, permitió establecer la modificación apropiada de la temperatura de inyección del aire y apertura de los dampers en las secciones 4 y 5, lo que llevo al sistema a operar con unas humedades relativas cercanas o incluso por debajo del 60%.
- El balance del HOOD dejó ver ciertas inconsistencias en los flujos, mostrando como el sistema se encuentra operando con corrientes en un 60% respecto a los valores dados al momento de la entrega del proyecto.
- Se observó como las vestiduras de la maquina (lonas) tienen un papel primordial en el procedimiento de secado, ya que la permeabilidad y resistencia química ayudan al aire a hacer la remoción del agua mucho más eficiente.
- Es esencial que se CONTINÚEN realizando balances HOOD empleando las nuevas vestiduras, para apreciar la magnitud del efecto que estas pueden tener sobre el sistema.
- A pesar de que los objetivos no fueron cumplidos en su totalidad, la información obtenida en este proyecto es bastante importante, pues permitió caracterizar parcialmente el proceso de secado en PAPELSA S.A, además, realizar modificaciones en variables de alto impacto en el proceso, que impactaran de forma significativa sobre los costos variables del proceso; tales como lo son el consumo específico de vapor, disminución en la corrosión de partes de la máquina y un mayor aprovechamiento de los recursos existentes.
- Los resultados obtenidos fueron un gran paso en el proceso de caracterización completa del sistema. Con el modelo matemático obtenido, será posible darle continuidad al proyecto, incluso profundizar cada vez más, para cuando sea posible obtener todas las variables faltantes.
- Aunque no se logró obtener un rango o valor preciso para la humedad absoluta, cuando se estuvieron realizando modificaciones en las variables al momento de las mediciones, se logró apreciar el alto impacto que esta variable tiene sobre el consumo de vapor, ratificando la relación inversamente proporcional que mantienen entre sí, pues, a medida que se aumentaba la humedad absoluta a la salida, el consumo general de vapor se disminuía. Esto se evidencio al observar las válvulas de control de inyección del vapor cerradas por completo.
- Se pudo apreciar como al disminuir la velocidad de extracción del aire, se alcanzaban mayores humedades absolutas a la salida. Esto debido a que se le daba más tiempo de residencia al aire dentro del HOOD, permitiéndole absorber más agua. Pero a pesar de esto, en ninguna de

las torres se logró alcanzar un valor mayor a 140 g H₂O/kg aire seco, aunque, no está muy lejos del valor mínimo recomendado de 150 g H₂O/kg aire seco, es claro que el sistema está en la capacidad de alcanzar valores mayores. Esta dificultad puede ser debido a posibles taponamientos en la lona por stickies, o porque la permeabilidad no sea la adecuada. Se recomienda hacer seguimiento de estas variables para descartar esta dificultad.

- Se pudo observar como situaciones esperadas no se cumplieron, tales como la condensación del vapor inyectado en las secciones 6 y 7. Dando una gran oportunidad de mejora y aprovechamiento energético del proceso. Pues al plantear la disminución de la temperatura para llevar al vapor a su estado de saturación al llegar a los cilindros en esta línea de inyección, ayudará a aprovechar el alto poder energético del condensado lleve a una posible reducción en el consumo de vapor.

Referencias Bibliográficas

- [1] Martínez, I. (1992). Termodinámica Básica y Aplicada.
- [2] 287, T. P. A. N. I. (1998). Drying in the paper industry.
- [3] Hill, K. C., & Inc., K. J. (2006). Optimización del uso de vapor en la sección de secado. Conferencia de fabricantes de papel TAPPI 2006.
- [4] PAPELSA S.A (2019). Operación secciones térmicas secado.
- [5] Tao J, Li J, Liu H, Li Y. (2011). Process parameters optimization for energy saving in paper machine dryer section
- [6] Water removal committee of engineering division (TAPPI) (2001). Recommended minimum dryer pocket air requirements.
- [7] Gutiérrez pulido H, De la vara Salazar R. (2008) Análisis y diseño de experimentos. McGraw Hill.
- [8] Kern, D. Q. (1999). *Procesos de Transferencia de calor*.
- [9] Albany International Corp.(2020) PAPELSA-MP-1 estudio del balanceo de campana
- [10] Albany International Brasil. (2012) Nociones básicas e introducción a las vibraciones mecánicas.

[11] TAPPI. (2005). Measurement of dryer condensing rates (Vertical separator method).

[12] Albany International Corp. Sucharski R. (2020) Entrenamiento Secado

Anexos

Anexo 1. Procedimiento de medición de condensado según la norma TAPPI.

Measurement of dryer condensing rates (vertical separator method)

Scope

This Technical Information Paper outlines a method for measuring the average rate of steam condensation of the drying cylinders that discharge into a separator tank. The tank must be equipped with shut-off valves and a sight glass or magnetic level indicator for observing the level of condensate in the tank.

Safety precautions

This method for measuring the rate of steam condensation places the technician near steam (hot water vapor) and condensate (hot liquid water) under pressure. Care must be taken to ensure that all equipment is properly and securely connected. Extreme care should be taken to avoid direct contact with hot pipes, valves, and other equipment. Use hand and eye protection when setting up and operating the equipment. Special care should be taken if atmospheric condensate drain valves are opened to help drain the separator. All specific mill safety requirements should be followed. Some mills require that paper machine operating personnel assist by turning hand valves.

Introduction

To accurately measure the dryer section condensing rate with a vertical separator, it is necessary that all connections to the separator and all joints in piping and components be completely tight so that no condensate leakage occurs. To accurately time the condensate rise, hand valve(s) must be easily turned and provide tight shut-off and sight glass must be clean so condensate level can be easily seen.

To accurately calculate condensate flow, a calibrated pressure gauge or thermometer (or both) should be installed to determine condensate specific volume. If local gauges are not available at the tank separator measure

Test preparation

1. Mark start and stop lines on the separator sight glass (see Fig. 1). Normally these marks should be 100 to 300 mm (4 to 12 in.) apart to provide an accurate measure of the condensate rise. The greater the condensate rise, the greater will be the measurement accuracy.
2. Lower the condensate level in the separator tank below the start mark on the sight glass or magnetic level indicator by adjusting the level control set point. Start mark may have to be raised if pump NPSH requirement prevents a low level operation.
3. Close all condensate drains from the separator, except the main condensate discharge line to the condensate pump.
4. Record the separator tank diameter and operating pressure or operating temperature. If a separator pressure or temperature gauge is not present or operational, the separator pressure can be determined by subtracting the differential pressure from the dryer steam pressure for the particular steam group being measured.

Test instructions

1. Simultaneously turn off the condensate pump, and close valve A, or close valve B, or increase the condensate level setpoint to maximum to close valve C. It is strongly preferred that hand valves A or B (usually gate valves) be shut instead of relying solely on the control valve C, since the gate valves are more likely to have tight shut off.
2. Using a stopwatch, measure the time required for the condensate to rise from the start to the stop mark on the sight glass. Record separator pressure to be sure conditions are constant.
3. Open the valve closed in Step 1, turn on the condensate pump, and lower the level control setpoint to return condensate level below the start mark on the level indicator.

4. Repeat the procedure in Steps 1 through 3 to ensure repeatable condensate rise times are recorded. This method usually requires only three tests.
5. Return level control setpoint to original level and wait to ensure that level stabilizes.
6. Calculate total condensing rate and average condensing rate per dryer using the following equations:

For SI units

$$W_c = \pi \left(\frac{D}{2 \times 100} \right)^2 \times \left(\frac{H}{100} \right) \times \left(\frac{3600}{VT} \right) = 0.00283 \left(\frac{D^2 H}{VT} \right) \quad (1)$$

For English units

$$W_c = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \times \left(\frac{H}{100} \right) \times \left(\frac{3600}{VT} \right) = 1.636 \frac{D^2 H}{VT} \quad (3)$$

- W_c = average condensing rate per dryer, kg/h (lb/h)
- H = height of condensate rise, cm (inch)
- D = inside diameter of separator tank, cm (inch)
- T = time of condensate rise, s
- \bar{V} = specific volume of condensate at separator pressure or temperature (saturated liquid condition), m³/kg (ft³/lb)
- N = number of dryers (being used) in steam group discharging into separator

The "specific volume" of the condensate in the separator tank is the inverse of the density. The values can be found from standard handbooks (1,2). Select values are listed in the tables below.

Dren.Dqiq Crsd=me:x BB:capnx=s

Additional informabon

Effective date of issue: January 10, 2005

Greg Wedel - Chairman, Johnson Corporation,
 Rick Lull, Johnson Corporation
 Doug Rounds, First Quality Tissue
 Jeff Reese, International Paper

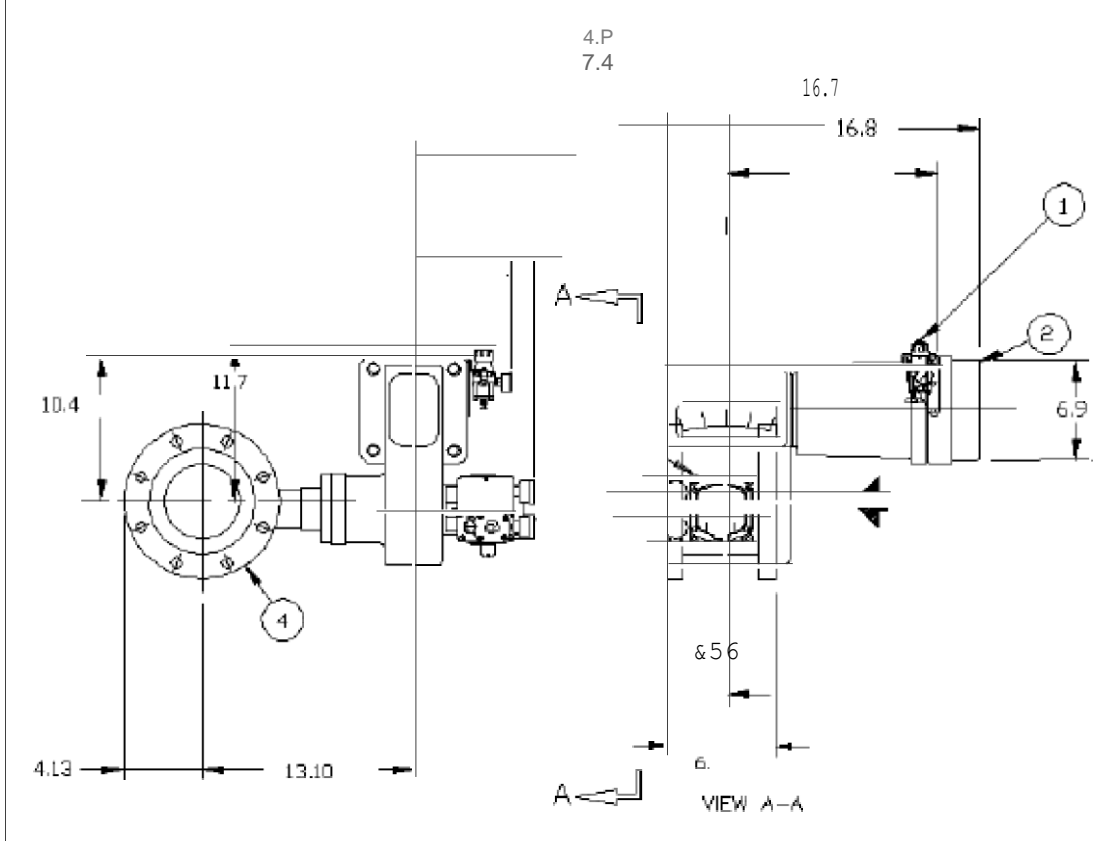
Anexo 2. Hoja de especificaciones válvula neumática para flujo de vapor en torres de aerotermia

| Masoneilan Valves | | 35-35112 | | Spec Data Sheet | | |
|---|--|-------------------------------|---------------------|---|--------------------------------|--------|
| Quote No: 08-20190108 | | End User: Papetea S.A. | | Project: Valvulas Reemplazo Planta Barbosa | | |
| Customer: | | Revision: | | End User Location: Barbosa | | |
| RFQ No: | | Revision: | | End User Country: COLOMBIA | | |
| Customer PO: | | Revision: | | VerSpeQ v4.13.0 | | |
| Tag: | PCV-613 | PID No: | | | | |
| General | Item No 3 | Item Revision | | Service | | |
| | Quantity 1 | Serial No | | Line No | | |
| TRIS Application / Area Class | | Non-Explosive / - | | Process Fluid / Fluid State | | |
| PED 2014/88 EU / Category / Fluid Group | | / / | | Ambient Temperature Min / Max | | |
| ANSI Leakage Class / NACE | | / / | | Design Press / Design Temp | | |
| | | | | Steam / Steam deg C / deg C | | |
| | | | | 5 bar g / 148 deg C | | |
| Line Size - Schedule - OD - Wall Inlet / Outlet 3 in - 80 - 0.3 - 3.5 / 3 in - 80 - 3.5 - 0.3 | | | | | | |
| Service Inputs | Sizing Conditions | | Units | Min | Norm | Max |
| | Flow Rate (total) | | | | | |
| | Flow Rate | | lbfh | 380 | 1170 | 3600 |
| | Inlet Pressure | | bar g | 3,4 | 3,4 | 3,4 |
| | Outlet Pressure | | bar g | 2,8 | 2,8 | 2,8 |
| | | Temperature | | deg C | 148 | 148 |
| Service Results | Flowing Cond. required Cv | | | 5,672 | 17,7 | 55,94 |
| | Sound Level, IEC | | dBA | < 70 | < 70 | 75 |
| | % Travel | | | 10,75 | 34,41 | 95,59 |
| | FL | | | 0,9377 | 0,8579 | 0,7 |
| | sonic diameter | | In | 0,3044 | 0,5341 | 0,9366 |
| | | Mach # Valve Outlet | | | 0,0102 | 0,0967 |
| Body Bonnet | Model No | | 35-35112 | | Body & Bonnet Matl | |
| | Body Type | | Globe, Rotary | | A216 gr WCC | |
| | Size (In x Body x Out) | | 3 In | | Integral | |
| | Rating / End Conn Inch | | CL 800 / RF Flanges | | PTFE with carbon fiber / - / - | |
| Face Finish | | 125 - 250 AARH | | Yoke Body Stud | | |
| | | | | A194 gr B8 d 1 | | |
| | | | | Yoke Body Nut | | |
| | | | | A194 gr 8 | | |
| Trim | Rated Cv | | 58 | | Plug Type | |
| | Trim Type | | Eccentric plug | | Eccentric | |
| | Characteristic | | Linear | | 316L St.St.Hard Faced | |
| | Size | | reduced area | | 316 St.St. | |
| | Flow Action | | Flow to Close | | Seat Ring Matl | |
| | | | | 316 St.St. | | |
| | | | | Cage/Retrn / Guide Matl | | |
| | | | | 316 St.St./440C St.St. | | |
| | | | | Stem/Shaft Matl | | |
| | | | | 630(H1075) St.St. | | |
| Actuator | Type | | Spring-diaphragm | | Model / Size | |
| | Fail Position | | Open | | 35 / 6 | |
| | Manual Override | | - | | Shutoff Pressure | |
| | Limit Stop | | - | | Bench Range / Travel | |
| Mounting / Installation | | 1 / Pipe horizontal (Default) | | 7-15 psi g / 50 deg | | |
| | | | | Supply Pressure / Oversize Factor | | |
| | | | | 21 psi g / 1 | | |
| | | | | Yoke Matl / Volume Chamber | | |
| | | | | Cast Iron / - | | |
| Positioner | Model | | SVI FF - 3112P121 | | Type | |
| | Input Signal / Characteristic | | Fieldbus / Linear | | Digital Fieldbus | |
| | Diagnostics Level / Position Transmitt | | Advanced / - | | FM / Intrinsically Safe | |
| | | | | Agency / Approval | | |
| | | | | Cl. I, Zone 2, AEx ic IIC / NEMA 4X / IP 66 | | |
| | | | | Approval Description: / Enclosure Rating | | |

option and at the expense to the customer, may make design changes to goods or materials not impacting form, fit, or function



NOTE: DRAWING IS NOT TO SCALE AND OBJECTS IN SOME CASES ARE NOT PROPORTIONAL. REFER TO DIMENSIONS FOR PROPER SPATIAL REPRESENTATION.



| | | | |
|--|--------|--------------------------------------|--------------------|
| ACTUA FOR k1BUNTING POSJ TIBMi 1 | | | |
| Re£ | NDIIEI | DE3CRJP £IBN | CDNNEC T ION WGT |
| 70-44 | | | |
| 3042 | | | |
| r Tf Ei OJMENS IO HS ANB LBC# TE OM OF WCCESS:ORIES Jh BJ CATE ENT 6KG | | TBTAL PACKAGE WEIGHT LBS UI | |
| T HIS P RIN 7 EERP EF IE D COR R E C: T F L i C L2 TO CIE R! | | TOLERANCES: PACKAGE WEIGHT LBS 121 | |
| REF. NML1BER. aB- eal ato6 rTEN NUPIBER i 3 | | TOLERANCES: DIMENSION UNITS: INCH | |
| Eh@ USER NAMEi Pap elsa 3.A. | | LINES ANGLES: SCALE: NONE | |
| TAG NUHBER LSJ PCV—613 | | REVISIONI | |
| | | PO.ITEHi | |