



UNIVERSIDAD  
MICHOCANA DE SAN  
NICOLAS DE HIDALGO



FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

*OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE SECADO EN UNA MÁQUINA DE  
PAPEL BOND*

*TESIS*

*Para obtener el título de*

*INGENIERO QUÍMICO*

*PRESENTA:*

*CRISTINA YURITZI VELÁZQUEZ GONZÁLEZ*

*DIRECTOR DE TESIS:*

*DR. LUIS FERNANDO LIRA BARRAGÁN*

*COASESOR:*

*DR. JEOVANI GONZÁLEZ PINEDA*

*Morelia, Michoacán, agosto del 2020.*

## **Dedicatoria**

Quiero expresar mi gratitud a Dios, quien con su bendición llena siempre mi vida y a toda mi familia por estar siempre presentes.

## **Agradecimientos**

A mis padres Salvador y Ma. Del Carmen quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía, de no temer las adversidades porque Dios está conmigo siempre.

A mis hermanos Cindy e Iván por su cariño y apoyo incondicional, durante todo este proceso, por estar conmigo en todo momento gracias. A toda mi familia porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas.

A mis abuelas Alicia y Ángela, que con su amor y consejos hicieron de mí una mejor persona. Me enseñaron que en esta vida se trabaja por lo que más se quiere sin importar las adversidades. Siempre fueron mi mayor motivación en todos estos años de estudiante.

A mis amigos y compañeros de clase, por apoyarme cuando más lo necesito, por extender su mano en momentos difíciles, sabiendo que sin importar el tiempo siempre podré contar con su apoyo.

Finalmente quiero expresar mi más grande y sincero agradecimiento al Dr. Luis Fernando Lira Barragán y M.C Jeovani González Pineda, principal colaborador durante todo este proceso, quien con su dirección, conocimiento, enseñanza y colaboración permitió el desarrollo de este trabajo.

# ÍNDICE

<b>INDICE DE TABLAS</b> .....	V
<b>INDICE DE GRAFICOS</b> .....	VI
<b>INDICE DE FIGURAS</b> .....	VII
<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>1.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN</b> .....	1
<b>1.2 OBJETIVO</b> .....	3
<b>1.3 OBJETIVOS PARTICULARES</b> .....	3
<b>1.4 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA E HIPÓTESIS</b> .....	3
<b>CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO</b> .....	5
<b>2.1. PULPEO</b> .....	5
<b>2.2 REFINACIÓN</b> .....	5
<b>2.3 MEZCLADO Y AGREGADO DE ADITIVOS</b> .....	6
<b>2.4 LIMPIEZA</b> .....	6
<b>2.5 DEPURACIÓN</b> .....	7
<b>2.6 FORMACIÓN DE LA HOJA</b> .....	7
<b>2.7 PRENSADO EN HÚMEDO</b> .....	8
<b>2.8 SECADO</b> .....	8
<b>2.9 ESTUCADO</b> .....	10
<b>2.10 CALANDRADO</b> .....	11
<b>2.11 BOBINADO</b> .....	11
<b>2.12 SECADO DE SÓLIDOS</b> .....	12
<b>2.13 MECANISMOS DE TRANSPORTE INTERNOS DE MASA</b> .....	14
<b>2.14 EL VAPOR</b> .....	15
<b>2.15 EL AIRE</b> .....	16
2.15.1 Temperatura de bulbo seco y temperatura de bulbo húmedo.....	16
2.15.2 Humedad relativa .....	16
2.15.3 Humedad absoluta .....	17
2.15.4 Presión de vapor .....	18
2.15.5 Fuerza motriz.....	18

2.16 DEFINICIÓN DE LA TASA DE SECADO.....	19
<b>CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA Y DESARROLLO DEL MODELO.....</b>	<b>20</b>
<b>3.1 MODELO DESCRIPTIVO.....</b>	<b>20</b>
<b>CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>25</b>
<b>4.1 MEDICIONES Y ESTUDIO DE LAS SECCIONES DE SECADO .....</b>	<b>25</b>
<b>4.2 RESULTADOS PARA EL KROMOS GRÁFICO.....</b>	<b>26</b>
4.2.1 Perfil de temperatura de la superficie de los cilindros y de la hoja a la salida de cada secador.....	26
4.2.2 Perfil de temperatura de bulbo seco y húmedo en cada “pocket”.....	28
4.2.3 Humedad relativa.....	30
4.2.4 Humedad absoluta.....	32
4.2.5 Presión de vapor.....	34
4.2.6 Fuerza motriz.....	36
4.2.7 Tasa de secado.....	38
4.2.8 Calculo de la humedad.....	39
<b>4.3 RESULTADOS PARA EL FOTOBOND.....</b>	<b>43</b>
4.3.1 Tasa de secado.....	48
4.3.2 Cálculo de la humedad.....	48
<b>CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>55</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>57</b>
<b>APENDICE.....</b>	<b>58</b>
A. Tablas de presión de vapor.....	58
B. Tablas de la densidad del agua a diferentes temperaturas.....	61
C. Psicrómetro .....	62
D. Pirómetro.....	64

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. 1 Producción anual promedio, de la máquina de papel, de acuerdo a los gramajes fabricados en Scribe planta Morelia en el año 2019.....	3
Tabla 3. 1 Configuración de los secadores en cada sección de secado. ....	21
Tabla 4. 1 Datos técnicos de la fabricación del papel .....	26
Tabla 4.2 Perfil de temperatura en las 3 primeras etapas de secado. ....	27
Tabla 4. 3 Perfil de temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo. ....	29
Tabla 4. 4 Datos y resultados del cálculo de la humedad relativa.....	31
Tabla 4. 5 Datos y resultados del cálculo de la humedad absoluta. ....	33
Tabla 4. 6 Datos de las presiones de vapor en la hoja y en el aire al interior de los “pockets”. ....	35
Tabla 4. 7 Fuerza motriz.....	37
Tabla 4. 8 Datos técnicos de la fabricación del papel. ....	43
Tabla 4. 9 Datos, mediciones y resultados del estudio de secado para Fotobond 75 gr/m <sup>2</sup> . ....	44
Tabla 4. 10 Perfil de temperaturas supuesto, de la hoja y superficie de los cilindros en la pre-sequería para Fotobond 75 gr/m <sup>2</sup> . ....	52
Tabla 13. Especificaciones técnicas de psicrómetro .....	62
Tabla 14. Datos técnicos de pirómetro UNI-T UT301C. ....	64

## INDICE DE GRAFICOS

Gráfica 1. 1 Producción anual según gramajes, de la máquina de papel de scribe en planta Morelia, año 2019.....	4
Gráfica 4. 1 Temperatura de la hoja y de los secadores en cada uno. ....	28
Gráfica 4. 2 Temperatura de bulbo seco y temperatura de bulbo húmedo en cada “pocket”. .....	30
Gráfica 4. 3 Humedad relativa al interior de los “pockets”.....	32
Gráfica 4. 4 Humedad absoluta al interior de los “pockets”. ....	34
Gráfica 4. 5 Presiones de vapor en la hoja y en el aire al interior de los “pockets”.....	36
Gráfica 4. 6 Fuerza motriz en el secado del papel.....	38
Gráfica 4. 7 Temperatura de la hoja y de los secadores en cada uno de estos para Fotobond 75 gr/m <sup>2</sup> . ....	45
Gráfica 4. 8 Temperatura de bulbo seco y húmedo para Fotobond 75 gr/m <sup>2</sup> .....	45
Gráfica 4. 9 Humedad relativa al interior de los “pockets” para Fotobond 75 gr/m <sup>2</sup> .....	46
Gráfica 4. 10 Humedad absoluta al interior de los “pockets” para Fotobond 75 gr/m <sup>2</sup> . ....	46
Gráfica 4. 11 Presiones de vapor en la hoja y en el aire al interior de los “pockets” para Fotobond 75 gr/m <sup>2</sup> . ....	47
Gráfica 4. 12 Fuerza motriz en el secado del papel para Fotobond 75 gr/m <sup>2</sup> .....	47

## INDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1 Biopapel Scribe S.A. de C.V., Planta Morelia. ....	5
Figura 2. 2 Proceso de pulpeo. ....	5
Figura 2. 3 Tren de refinadores para celulosa. ....	6
Figura 2. 4 Tanque de pasta mezclada.....	6
Figura 2. 5 Sistema de limpiadores. ....	6
Figura 2. 6 Sistema de depuradores.....	7
Figura 2. 7 Mesa de formación Top Former, en Scribe Planta Morelia. ....	7
Figura 2. 8 Inicio y salida de la mesa de formación. ....	8
Figura 2. 9 Primera y segunda prensa.....	8
Figura 2. 10 Esquema de la configuración de las secciones de secado. ....	9
Figura 2. 11 Secciones de secado. ....	10
Figura 2. 12 Estucado o prensa de encolado. ....	11
Figura 2. 13 Rodillos de calandra y escáner ABB.....	11
Figura 2. 14 Rollo fabricado y bobinado.....	12
Figura 2. 15 DTI, Máquina de papel, Scribe Morelia.....	12
Figura 2. 16 Etapas del movimiento de humedad durante el secado de un medio poroso. ..	14
Figura 2. 17 Representación esquemática del frente evaporativo en retroceso.....	15
Figura 3. 1 Representación del paso de la hoja a través de la prensa. ....	20
Figura 4. 1 Zona de la sección de secado denominada como “pocket”.....	25

## RESUMEN

Se identificaron los mecanismos de transporte de masa y calor, iniciando con una revisión de investigaciones sobre el secado de sólidos y el proceso de secado en las máquinas de papel para escritura.

En este proyecto se realiza un estudio del proceso de fabricación del papel en la máquina de Biopapel Scribe S.A de C.V. Planta Morelia. Profundizando en el proceso de secado, donde particularmente se realizan mediciones de las condiciones de operación, para conocer y determinar las variables que de forma directa inciden en dicho proceso y que serán necesarias para la evaluación del modelo matemático propuesto.

En este sentido, el proceso de secado desempeña una tarea medular para la estabilidad y eficiencia del proceso en general, así como para que el producto final cumpla con las características requeridas para los fines que se empleará, lo cual es fundamental en la producción en masa del papel.

El costo del secado del papel es muy elevado debido al costo de la energía necesaria para obtener el vapor a altas temperaturas y que cede como calor latente. Por lo que se propuso un perfil de temperaturas para los secadores, así como las condiciones de operación óptimas en las cuales se podría lograr una reducción del consumo de vapor, mayor eficiencia, estabilidad operativa y por ende una mayor productividad.

**Palabras clave:** Optimización, Secado de papel, Modelo matemático.



## **ABSTRACT**

The mechanisms of mass and heat transport were identified, beginning with a review of researches related to the drying of solids and the drying process in writing paper machines. In this project, a study of the paper manufacturing process is carried out on the Biopapel Scribe S.A de C.V. machine. Morelia plant, emphasizing into the drying process, where, in particular, measurements of the operating conditions are carried out in order to know and determine the variables that directly affect the process and that will be necessary for the evaluation of the proposed mathematical model.

In this sense, the drying process plays a central task for the stability and efficiency of the general process, as well as for the final product to meet the characteristics required for the purposes to be used, which is essential in paper mass production.

The paper drying cost is very high owing to the energy cost required to obtain the steam at high temperatures and which is transferred latent heat. Therefore, a temperature profile was proposed for the dryers, as well as the optimal operating conditions, in which a reduction in steam consumption, greater efficiency, operational stability and therefore greater productivity could be achieved.

# CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

## 1.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

El papel y los productos papeleros tienen marcada importancia en la vida cotidiana, sus aplicaciones son ilimitadas y se encuentran en continuo desarrollo para obtener productos especiales. El nombre de “papel” se deriva de la planta llamada *Cyperus papyrus*, que en el antiguo Egipto se utilizó como el primer material de escritura uniendo entre sí finas láminas del tallo de esta planta, aunque el papel auténtico fue inventado en China (siglo I d.C.) y elaborado a partir de la corteza de la morera papirofera (*Broussonetia Papyrifera*) y de residuos agrícolas (paja de arroz, cáñamo, algodón, etc.) [1]. Después de varios siglos, el arte de la fabricación del papel alcanzó el oriente medio (siglo VIII) y más tarde, a través de la España árabe, al resto de Europa utilizando como materias primas trapos de lino y algodón; en el siglo XV existían múltiples molinos papeleros en España, Italia, Alemania y Francia [2]. En el siglo XX se desarrolla rápidamente nuevas tecnologías e implementaciones en el sector paplero con la introducción de nuevas materias primas (fibras madereras - no madereras y fibras sintéticas), técnicas de cocción y blanqueo en continuo (múltiples etapas), estucado en máquina, formación en seco, entre otros avances han permitido mejorar la productividad y cumplir con la creciente demanda que no se ha visto obstaculizada por la tecnología electrónica.

En la formación del papel, las fibras celulósicas deben desarrollar uniones que permitan la obtención de papeles con determinada calidad (que varía según la aplicación final). Las uniones o enlaces interfibrilares son consecuencia de las atracciones fisicoquímicas en el medio acuoso cuya intensidad queda determinada por el tipo de fibra, por los procesos de obtención (cocción, blanqueo), por los etapas requeridas en la fabricación del papel (desintegración, refinado, secado, etc.) y por la utilización de productos químicos auxiliares que activan los grupos determinantes para formar una estructura fibrosa con suficiente fuerza de unión para conseguir papeles con determinada resistencia.

El enlace puente de hidrógeno es la principal fuente de unión entre las fibras, el efecto de hidratación de las superficies de las fibras se verifica a través de enlaces de este tipo entre el agua y los grupos hidroxilos de la superficie celulósica cuyo mecanismo de unión se extiende a los grupos hidroxilos de la superficie de las fibras vecinas al eliminar el agua. A medida que se va formando el manto fibroso, las fibras entran en contacto más íntimo y los enlaces puentes de hidrógeno entre fibras contiguas comienzan a desarrollarse y consolidarse a lo largo de la sequería. Las uniones interfibrilares dependen de diversos factores, las mejores condiciones en las fibras de celulosa se presentan cuando se elimina la lignina con substancial retención de hemicelulosas.

El transporte de humedad durante el secado del papel se manifiesta por la coexistencia de varios fenómenos, que se manifiestan en diferentes tiempos y con diferentes intensidades. El contenido de humedad es una variable importante de la calidad en la fabricación del papel. Hay un considerable incentivo económico en mantener la humedad bien regulada. Una máquina de papel moderna fabrica alrededor de 1000 ton por día. Con un precio de papel de 900 dolares/ ton, la reducción de variaciones de humedad de 0.1% corresponde a un ahorro de más de 300 000 dolares/año.

Un proceso de secado optimizado, en las máquinas de papel, es esencial para un buen control de humedad, y por consiguiente para reducir sus costos de producción, es aquí donde radica la justificación del presente trabajo.

## 1.2 OBJETIVO

El objetivo general del presente proyecto es el estudio del proceso de secado, en la producción de papel bond y sistematizar el balance térmico de la máquina de papel de Biopapel Scribe, Morelia.

## 1.3 OBJETIVOS PARTICULARES

- Realizar un estudio de secado y de las condiciones de operación en la máquina de papel de Biopapel Scribe, Morelia.
- Determinar las condiciones óptimas de operación que inciden en la eficiencia del secado del papel.
- Sistematizar y optimizar el funcionamiento las secciones de secado en la máquina de papel bond, de Biopapel Scribe, Morelia.

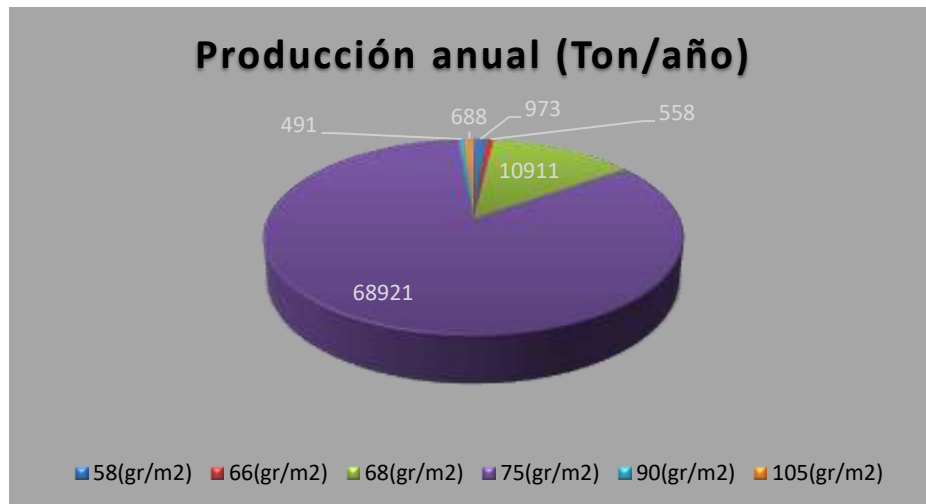
## 1.4 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA E HIPÓTESIS

En la máquina de papel de Biopapel Scribe S.A de C.V Planta Morelia, se fabrican principalmente papeles para escritura y fotocopiado, con gramajes que van desde los 50 gr/m<sup>2</sup> hasta los 135 gr/m<sup>2</sup>, siendo los más comúnmente producidos los de 68 gr/m<sup>2</sup> y 75 gr/m<sup>2</sup>, los cuales representan un volumen total de la producción del 13.22% y 83.50%, respectivamente.

*Tabla 1. 1 Producción anual promedio, de la máquina de papel, de acuerdo a los gramajes fabricados en Scribe planta Morelia en el año 2019.*

<i>Papel (gr/m<sup>2</sup>)</i>	<i>Producción anual (Ton/año)</i>	<i>Volumen de producción (%)</i>
58	973	1.18
66	558	0.68
68	10 911	13.22
75	68 921	83.50
90	491	0.59
105	688	0.83
<i>Total</i>	82 542	100.00

A continuación, se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** las toneladas producidas en la máquina de Scribe planta Morelia según los tipos de gramajes fabricados en el año 2019.



*Gráfica 1. 1 Producción anual según gramajes, de la máquina de papel de scribe en planta Morelia, año 2019.*

El secado del papel es un proceso intermedio de su fabricación, pero de máxima relevancia, para que éste cumpla los requerimientos y características que el cliente demanda.

A lo largo de la superficie de la hoja de papel húmedo, la velocidad de secado es constante y es influenciada por la temperatura de la superficie libre, el coeficiente de transferencia de masa y la presión diferencial de vapor entre la superficie del papel y el medio secante (cilindro secador), durante este punto el agua que es evaporada de la superficie del papel va siendo reemplazada por agua extraída de los huecos y de los capilares de la hoja.

Una comprensión y descripción detallada y acertada de los fenómenos de transporte de masa y energía que ocurren en el de secado de papel bond, podría contribuir significativamente en la mejora, eficiencia y reducción de costos del proceso productivo de este sector.

## CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

En la actualidad el proceso de fabricación de papel se divide en una serie de operaciones que se describen a continuación, en el orden en que se llevan a cabo durante su producción en línea, [3]. Para efectos del presente trabajo se contará con las instalaciones de la máquina de papel de Biopapel Scribe S.A. de C.V. Planta Morelia. Figura 2.1.



*Figura 2.1 Biopapel Scribe S.A. de C.V., Planta Morelia.*

### 2.1. PULPEO

Es la operación mecánica por medio de la cual se somete a una fuerte agitación, en suspensión acuosa, la celulosa que viene en base húmeda (con un contenido de 65 a 70% de humedad) con el fin de desfibrarla y obtener una mezcla uniforme con una consistencia del 4% de contenido de fibra en peso, lo anterior tiene lugar en un equipo denominado hidrapulper provisto de un rotor central con cuchillas de desgaste instaladas en el fondo.



*Figura 2.2 Proceso de pulpeo.*

### 2.2 REFINACIÓN

Es la operación por la cual, mediante la acción de un trabajo mecánico y en presencia de un medio acuoso, se modifica la morfología de las fibras y su estructura físico-química, es decir, se acorta la longitud de la fibra (corte transversal) o bien se le somete a fibrilación (corte

longitudinal) lo anterior va de acuerdo a las características físicas que se requieran en el producto terminado, como son, resistencia al rasgado, a la tensión, rigidez, etc.



*Figura 2.3 Tren de refinadores para celulosa.*

### 2.3 MEZCLADO Y AGREGADO DE ADITIVOS

Después del proceso de refinación y de acuerdo a la composición deseada se mezclan los diferentes tipos de celulosas (fibra larga -de pino-, fibra corta -de encino y eucalipto-) y se les agregan los aditivos como son: encolante, agente de retención, sulfato de aluminio, colorantes, microbicidas, carbonato de calcio y almidones.



*Figura 2.4 Tanque de pasta mezclada.*

### 2.4 LIMPIEZA

Una vez mezcladas las diferentes especies de celulosas formando una pasta con aproximadamente 3% de consistencia se hace pasar por una serie de separadores ciclónicos en los cuales mediante la diferencia de densidades y por la acción de la fuerza centrífuga se separan los materiales y/o impurezas que contiene la pasta.



*Figura 2.5 Sistema de limpiadores.*

## 2.5 DEPURACIÓN

Operación mediante la cual por la diferencia de dimensiones se separa la pasta (mezcla de las celulosas y aditivos) de todas aquellas partículas y/o impurezas que perjudican el papel y pueden causar problemas durante su proceso de fabricación.



*Figura 2.6 Sistema de depuradores.*

## 2.6 FORMACIÓN DE LA HOJA

Una vez limpiada y depurada, la pasta es alimentada a la caja de distribución, en donde se trabajan consistencias en el rango de 0.3 a 1% de acuerdo al gramaje que se vaya a producir; por lo tanto la cantidad de agua que debe ser eliminada para obtener un papel con un contenido de humedad de 4 a 5% está en el rango de 100 a 500 m<sup>3</sup>/ton de papel seco. La caja de distribución vierte la pasta uniformemente a todo lo ancho de la mesa de formación, misma que esta provista de una tela en forma de banda sinfín, de malla con un claro determinado que funciona como una coladera y la cual corre sobre unos rodillos, en donde el agua se drena por gravedad y por contacto con elementos de drenado (celdas cerámicas), cajas de succión abajo y arriba de la tela inferior y superior, respectivamente, a la salida de esta sección el contenido de humedad es de aproximadamente el 80%.



*Figura 2.7 Mesa de formación Top Former, en Scribe Planta Morelia.*





*Figura 2.8 Inicio y salida de la mesa de formación.*

## 2.7 PRENSADO EN HÚMEDO

De la mesa de formación la hoja pasa a la sección de prensas donde la hoja se somete a presión entre 2 rodillos siendo conducida la hoja por un fieltro el cual es una banda sinfín de material sintético el cual recibe el agua que es obligada a salir de los poros de la hoja. En la máquina de esta fábrica se trabaja con 2 prensas, la primera está compuesta por dos rodillos, siendo el inferior liso y el superior un cilindro perforado revestido con una malla de polipropileno. La segunda prensa está constituida por un rodillo superior liso y uno inferior acanalado, por lo que el agua extraída en la primera prensa pasa al fieltro y de ahí es succionada por el cilindro superior por medio de vacío, en la segunda prensa el agua pasa al fieltro y de este a los canales del rodillo inferior de donde es desalojada por gravedad. A la salida de la sección de prensas el papel sale con un contenido de humedad del 65%.



*Figura 2.9 Primera y segunda prensa.*

## 2.8 SECADO

El papel húmedo de la sección de prensas se pasa por una serie de secadores calentados con vapor, de 60 in. de diámetro y 192 in. de cara, se seca hasta contener aproximadamente  $2\% \pm 1$  al salir de la tercera sección de secado (pre-sequería) y  $4\% \pm 1$  al salir de la cuarta sección de secado (post-sequería). La teoría del secado o remoción de agua depende de un fenómeno físico llamado presión de vapor, es decir, para que la humedad de la hoja pueda escapar de

ella, se necesita que la presión de vapor del agua dentro de la hoja sea mayor que la presión de vapor en el aire que circula arriba de ésta. Para desarrollar dicha presión o fuerza motriz, la hoja es calentada sobre un secador. Como todas las otras condiciones permanecen constantes, entre más calor aplicado, más grande será la fuerza motriz y más rápidamente la humedad escapará [3].

El papel se mantiene firmemente contra los cilindros secadores por medio de una lona (banda sin fin, con cierta permeabilidad) la cual ayuda también a pasar el papel a través del banco de secadores.

El conjunto de secadores está dividido en cuatro secciones, teniendo cada una de ellas su propia lona superior e inferior (excepto la primera sección que cuenta con sólo una lona). En las tres primeras secciones se cuenta con un total de 35 secadores y en la cuarta sección con 14. Figura 2.10.

El vapor y el condensado entran y salen del secador, respectivamente a través de una junta giratoria instalada sobre el eje del cilindro, requiriéndose de una altura de aspiración de 30 in. para un secador de 60 in. de diámetro. Entre el sistema del secador y la línea de condensado, debe haber una diferencia de unas 2 lb/in<sup>2</sup> de presión para hacer subir el agua por el tubo del sifón. La instalación consta de tres etapas de secado antes del estucado y una después.

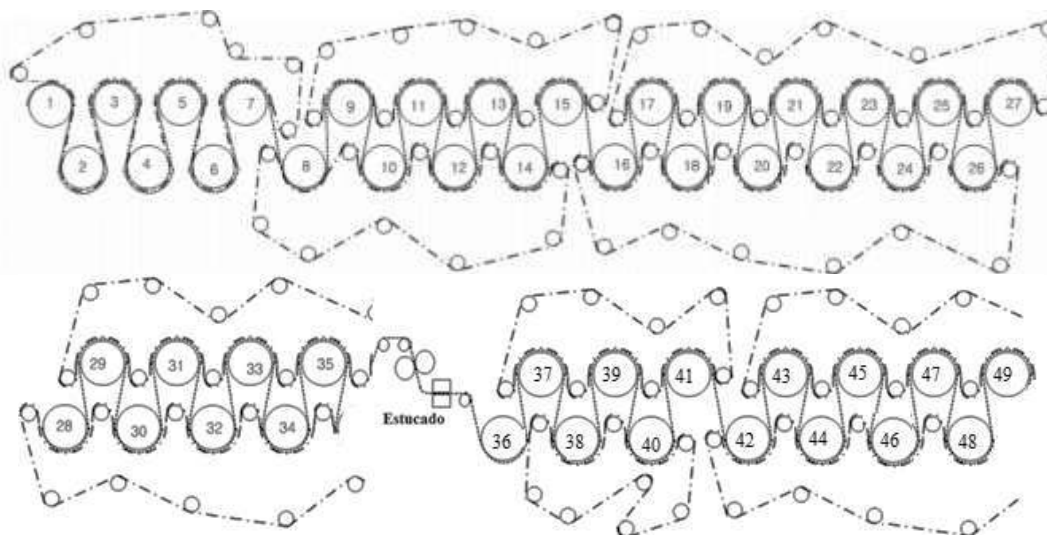


Figura 2.10 Esquema de la configuración de las secciones de secado.

Cuando el papel es secado sobre cilindros calentados, la película de agua que se encuentra en la superficie expuesta al ser evaporada se pasa a través de los poros, esto hace posible que el vapor desplace el agua alejada en los mismos y la elimine. Al tener un gradiente de temperatura en la hoja, parte de este vapor será condensado dentro de la hoja y el resto calentará el agua del interior de la hoja y la arrastrará hasta el otro extremo o cara de la misma, y entre tanto los huecos creados por la evaporación en los capilares de la superficie se vuelven a llenar por capilaridad por el agua de los huecos del interior de hoja, así el agua fluye y se evapora por ambas caras de la hoja.



*Figura 2.11 Secciones de secado.*

## 2.9 ESTUCADO

Operación que consiste en cubrir la superficie del papel con un material en estado líquido dándole a la hoja una serie de propiedades adecuadas para la impresión. En el caso particular de la maquina en cuestión, el material líquido con el que se realiza el estucado consiste en un almidón de papa mezclado con un colorante. Debido a la estructura porosa del papel, cuando éste entra en contacto con la tinta de impresión, ésta tiende a extenderse en todas direcciones. Para evitar esto, es necesario conseguir una superficie lisa y uniforme. Además de lo anterior, el papel estucado tiene una gran cantidad de propiedades, como son: alta resistencia al agua, bajo poder absorbente, lo cual hace que se consuma menos tinta a la hora de imprimir, superficies muy finas, pH alcalino, lo cual proporciona mayor facilidad para el secado de tintas, mayor nitidez en las imágenes impresas, etc.



*Figura 2.12 Estucado o prensa de encolado.*

## **2.10 CALANDRADO**

La calandra consta de una serie de rodillos (en la máquina de Planta Morelia, consta de 6 rodillos) colocados uno sobre otro, que giran haciendo pasar la hoja entre el primero y segundo rodillo inferior y donde el peso nominal de los rodillos superiores presionan la hoja para conferirle propiedades de lisura y espesor, principalmente, e infiriendo en cierta medida en el brillo y/o blancura del papel. Después de pasar por la calandra, el papel es enrollado en un rodillo denominado mandril, el ancho de la hoja y el radio del rollo dependen del papel fabricado, pero van desde 4.25 a 4.45m y de 0.33 a 0.53m, respectivamente.



*Figura 2.13 Rodillos de calandra y escáner ABB.*

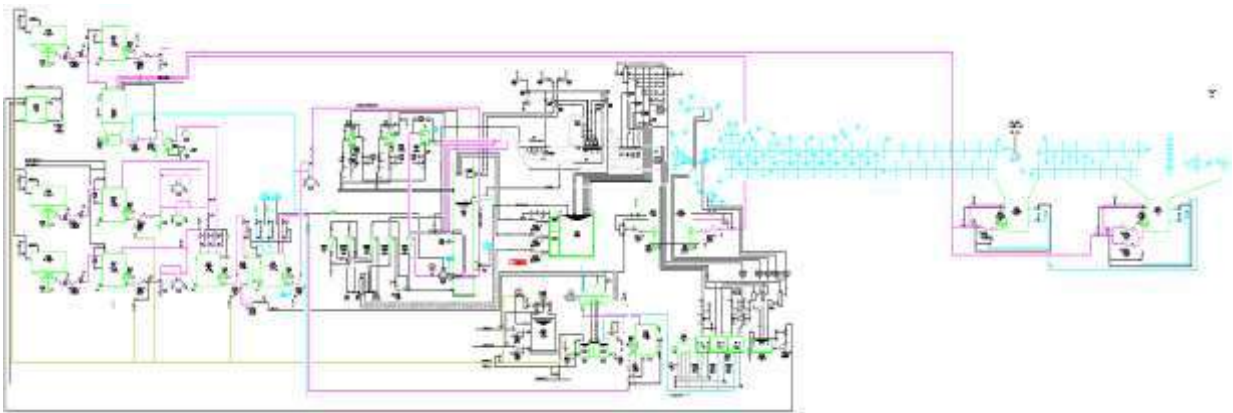
## **2.11 BOBINADO**

La operación de bobinado tiene la misión de cortar (bobinar) el rollo (rollo maestro) que sale de la máquina (después haber pasado por la calandra) en bobinas con las dimensiones (ancho y altura) y características determinadas, solicitadas por el cliente.



*Figura 2.14 Rollo fabricado y bobinado.*

Mediante el siguiente diagrama se muestra la secuencia del proceso de fabricación de papel de forma muy general en cada una de las operaciones descritas con anterioridad.



*Figura 2.15 DTI, Máquina de papel, Scribe Morelia.*

## 2.12 SECADO DE SÓLIDOS

El secado de sólidos es un proceso complicado que involucra fenómenos acoplados de transferencia de masa y calor. El comportamiento del secado puede estar influenciado por una gran variedad de factores independientes, incluyendo, por ejemplo condiciones ambientales de temperatura, velocidad del aire y humedad relativa y propiedades del sólido tales como la densidad, porosidad e higroscopicidad. La caracterización del comportamiento de secado mediante la experimentación requiere de un gran esfuerzo debido al excesivo número de variables que deben ser consideradas.

Uno de los primeros análisis del secado de sólidos fue realizado Lewis [4], quien postuló que el secado consistía de dos procesos, la difusión de humedad en el interior del sólido y la evaporación de la humedad desde la superficie del sólido.

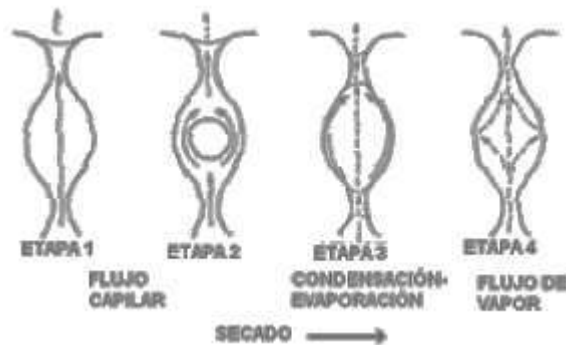
Comings y Sherwood [5], indicaron que la acción capilar podría ser un mecanismo importante en el movimiento de líquido durante el secado de sólidos porosos, advirtiéndose que el término difusión debiera ser aplicado con cuidado. El transporte debido a fuerzas capilares se presentó en términos de gradientes de contenido de humedad y temperatura resultando al final una ecuación del tipo difusiva. Ecuaciones similares de masa y calor en medios porosos fueron realizadas por Luikov [6]. Las ecuaciones diferenciales aplicadas a medios porosos fueron inferidas de manera intuitiva guiada por los resultados experimentales y las ecuaciones de conservación.

El secado está dividido típicamente por un periodo de velocidad constante y un periodo de velocidad decreciente. La velocidad de secado en el primer periodo está determinada por condiciones externas al material las cuales incluyen temperatura, velocidad del aire, presión total y presión parcial de vapor. La resistencia controlante puede estar asociada con la transferencia de energía en el sólido o la transferencia de masa fuera del sólido. La transferencia de masa durante el periodo de velocidad constante involucra difusión de vapor de agua desde la superficie del sólido hacia la capa límite del medio de secado. Durante el periodo de velocidad decreciente, la velocidad de secado disminuye con el tiempo y la velocidad de transferencia interna de masa a la superficie del material controla el proceso. Un periodo de velocidad decreciente puede ser observado cuando la resistencia a la transferencia interna de masa es controlante y la presión de vapor de la superficie del sólido disminuye conforme disminuye el contenido de humedad.

Mediciones de la temperatura de la muestra durante el secado ayudan a identificar si el proceso es controlado por la transferencia de energía o masa. Una temperatura del sólido igual a la temperatura de bulbo húmedo (temperatura indicada por un termómetro cuyo bulbo está cubierto por una vestidura humedecida y por la cual la mezcla aire-vapor pasa rápidamente) del medio de secado es característica de un control por transferencia de energía. Si la muestra alcanza la temperatura de bulbo seco (temperatura de la mezcla aire-vapor de agua) la transferencia de masa es la controlante, es decir, es la que gobierna el proceso. En el secado de material con alto contenido de humedad ( $>1$  kg. de  $H_2O$ /kg de sólido seco) es necesario considerar el transporte de energía.

### 2.13 MECANISMOS DE TRANSPORTE INTERNOS DE MASA.

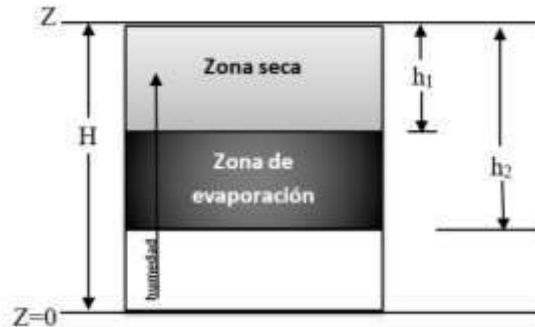
Para un medio poroso se puede distinguir la existencia de varias etapas en el transporte interno de humedad [7] como se muestra en la Figura 2.16. Primero el poro está lleno de líquido que emigra deslizándose por las paredes capilares permitiendo que se formen bolsas de aire (“pocket”) que reemplazan la pérdida de humedad, posteriormente que la humedad se ha removido de la parte más ancha del poro, la humedad emigra deslizándose por las paredes del capilar y por sucesivas evaporaciones y condensaciones en los puentes de líquido que se forman en las partes estrechas del poro, finalmente los puentes de líquido se evaporan totalmente quedando la humedad adsorbida siguiendo un proceso de adsorción desorción llegándose a un equilibrio del material con el ambiente. Esta descripción se particulariza para cada material principalmente por la estructura del material, esto es, estará influida por la existencia de micro y macro poros, así como por su distribución en el material.



*Figura 2.16 Etapas del movimiento de humedad durante el secado de un medio poroso.*

Se han propuesto diversos mecanismos de transferencia interna de masa [8], [9]. Tomando en cuenta la fase que se transporta, la transferencia del líquido puede darse por difusión, flujo capilar, difusión superficial y flujo hidrodinámico. La transferencia de vapor se puede dar como, difusión mutua, difusión tipo Knudsen, efusión, flujo hidrodinámico (difusión tipo Stefan, difusión tipo Poiseuille), evaporación-condensación y en ciertos casos se puede dar el transporte debido a presión osmótica, por acción de gravedad, por encogimiento del material, etc.

En un material sujeto al secado se pueden encontrar 3 zonas, la seca, la de evaporación y la húmeda. Durante el periodo de velocidad de secado constante, la zona húmeda, llena totalmente el material y la evaporación toma lugar en la superficie del mismo (Figura 2.17).



*Figura 2.17 Representación esquemática del frente evaporativo en retroceso.*

## 2.14 EL VAPOR

Cuando se aplica energía en forma de calor al agua, su temperatura se incrementa, hasta el punto en que el agua está cerca de la condición de ebullición, en ese momento algunas moléculas adquieren suficiente energía cinética para alcanzar la velocidad que les permita escapar del interior del líquido hacia la superficie, antes de caer de nuevo en el líquido. La adición de más calor causa un aumento en la excitación y un incremento en el número de moléculas con la energía suficiente para dejar el líquido. Cuando el agua es calentada hasta el punto de ebullición, las burbujas se elevan desde el interior del líquido y rompen en la superficie. Si las moléculas que escapan de la superficie del líquido son más que las que regresan, el agua se evapora libremente; en este momento, se ha alcanzado el punto de ebullición o temperatura de saturación. Si la presión permanece constante, la adición de más calor no causa un aumento en la temperatura, pero hace que el agua pase a la forma de vapor saturado. La temperatura de ebullición del agua y la del vapor saturado son iguales si hacen parte del mismo sistema, pero, la energía por unidad de masa es mucho mayor en el vapor. Cuando el proceso de evaporación de agua se hace a altas presiones, debe adicionarse más calor; y como consecuencia, la temperatura de saturación y la entalpía del vapor se incrementarán. La relación entre la temperatura de saturación y la presión es conocida como curva de saturación del vapor [10].



## 2.15 EL AIRE

El aire es una mezcla de nitrógeno, oxígeno, vapor de agua y pequeñas cantidades de otros de gases. El aire con cierto contenido de humedad se conoce como aire atmosférico, en contraste, el aire que no contiene vapor de agua se conoce como aire seco. El aire atmosférico se trata como una mezcla de gases ideales cuya presión es la suma de la presión parcial del aire seco ( $P_a$ ) y la presión parcial del vapor de agua en el aire ( $P_{v,a}$ ) [11].

$$P = P_a + P_{v,a} \quad (2.15.1)$$

### 2.15.1 Temperatura de bulbo seco y temperatura de bulbo húmedo

Temperatura de bulbo seco: es la temperatura de una mezcla de gas-vapor. Normalmente es medida con termómetro, es la temperatura de la mezcla aire vapor de agua.

Temperatura de bulbo húmedo: es la temperatura indicada por un termómetro cuyo bulbo está cubierto con una vestidura humedecida y por la cual la mezcla aire-vapor pasa rápidamente. Es el equilibrio de la temperatura alcanzada por una superficie húmeda inmersa en una mezcla de vapor de agua-aire a alta velocidad.

### 2.15.2 Humedad relativa

Es la presión parcial del vapor de agua de un aire húmedo dividido por la presión parcial del vapor de agua en aire saturado a la misma temperatura, en otras palabras, indica que tan saturado está el aire de humedad y se expresa como porcentaje.

$$HR = \frac{e(T)}{e_s(T)} \cdot 100\% \quad (2.15.2)$$

donde:

$HR$  = humedad relativa en %,

$e(T)$  = presión parcial real del vapor de agua en aire húmedo, en Pa,

$e_s(T)$  = presión parcial de vapor de agua en aire húmedo saturado, en Pa.

La Presión parcial de vapor saturado expresa el hecho de que a una temperatura dada, existe un máximo en la cantidad de vapor de agua que puede estar presente, en otras palabras es la

máxima presión parcial  $e_z(T)$  que puede ejercer el vapor de agua a una temperatura (bulbo seco) particular ( $t$  ó  $T$ ).

$$e_s(T) = 1Pa \cdot e^{(AT^2+BT+C+\frac{D}{T})} \quad (2.15.3),$$

donde:

$e_s(T)$  = presión parcial de vapor de agua en aire húmedo saturado en Pa, a la temperatura de bulbo seco  $T$

$e = 2.718\ 281\ 828\ 46$  = base de logaritmo natural (neperiano) o número de Euler.

$$A = 1.237\ 884\ 7 \times 10^{-5}$$

$$B = -1.912\ 131\ 6 \times 10^{-2}$$

$$C = 33.937\ 110\ 47$$

$$D = -6.343\ 164\ 5 \times 10^3$$

$T$  = temperatura de bulbo seco en °K =  $t(^{\circ}\text{C}) + 273,15$

La Presión parcial real de vapor de agua se obtiene de la siguiente ecuación:

$$e(T) = e_s(T_w) - P(T - T_w)(\psi + \varphi T_w) \quad (2.15.4),$$

donde:

$e(T)$  = presión parcial real de vapor de agua en aire húmedo en Pa, a la temperatura de bulbo seco  $t$  ó  $T$ .

$e_s(T_w)$  = presión parcial de vapor de agua en aire húmedo saturado en Pa, a la temperatura de bulbo húmedo.

$T_w$  ó  $tw$

$P$  = presión atmosférica local en Pa = 101325 Pa.

$T_w$  = temperatura de bulbo húmedo en K =  $tw(^{\circ}\text{C}) + 273,15$

$$\psi \text{ (psi)} = 4,53 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$$

$$\varphi \text{ (fi)} = 7,59 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-2}$$

### 2.15.3 Humedad absoluta

La humedad absoluta del aire para cualquier condición dada, es la masa de vapor de agua por unidad de volumen de aire a dicha condición, como tal esto es propiamente la expresión de la densidad de vapor.

Relación de masa de vapor de agua a masa de aire seco que existe en el aire húmedo.

$$HA = 0.62198 \frac{P_v}{101325 - P_v} \quad (2.15.5)$$

donde

HA [=] kg agua/kg aire seco.

$P_v$  es la presión de vapor a la temperatura de bulbo húmedo en Pa.

#### 2.15.4 Presión de vapor

Si el vapor y el líquido de un componente puro están en equilibrio, la presión de equilibrio se denomina presión de vapor. A una temperatura dada, sólo hay una presión en la que las fases líquida y vapor de una sustancia pura pueden existir en equilibrio. Desde luego, cualquiera de las dos fases puede existir dentro de un intervalo de condiciones amplio.

A partir de un balance de energía se obtiene la siguiente ecuación psicométrica para determinar la presión de vapor del aire

$$P_v = P_{vs,bh} - a P (T - T_{bh}) \quad (2.15.6),$$

donde

$P_v$  = presión de vapor del aire.

$P_{vs,bh}$  = presión de vapor de saturación (de tablas) a la temperatura de bulbo húmedo.

$a$  = factor psicométrico =  $0.00064 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

$P$  = presión atmosférica = 1.01 bar.

$(T - T_{bh})$  = diferencia o depresión psicométrica (diferencia entre la temperatura de bulbo seco y de bulbo húmedo).

#### 2.15.5 Fuerza motriz

La diferencia de la presión de vapor en la hoja y la presión de vapor en el aire se le conoce como fuerza motriz, y es un indicativo de la transferencia de masa (evaporación) de la hoja al aire del “pocket”. A mayor diferencia mayor capacidad de evaporación.

$$\text{Fuerza motriz} = P_{v_{hoja}} - P_{v_{aire}} ; \text{ bar} \quad (2.15.7)$$

## 2.16 DEFINICIÓN DE LA TASA DE SECADO

La tasa de secado (TDR) aplicada al secado en la maquina se define como la cantidad de agua evaporada por hora por unidad de superficie de secado. La superficie de secado se define como la longitud circunferencial total de los secadores calentados por vapor que están en contacto con la hoja, multiplicada por el ancho de la hoja en el carrete. La tasa de secado se expresa en libras por hora por pie cuadrado en unidades habituales y en kilogramos por hora por metro cuadrado en unidades del S, y se notifica con la temperatura media del vapor.

Las ecuaciones 2.16.1 y 2.16.2 se utilizan para calcular la tasa de secado de los papeles no recubiertos.

$$M = \frac{L}{E} - 1 \quad (2.16.1)$$

$$R_W = 60 \frac{S B M}{N A \pi D} \quad (2.16.2)$$

Donde, el factor 60 es minutos por hora y las variables se definen como;

$R_W$  = Tasa de secado, cantidad de agua evaporada, kg/h m<sup>2</sup>.

S = velocidad de la máquina, m/min.

B = Peso de la hoja al salir de la sección de secado (base húmeda), kg/m<sup>2</sup>.

M = Peso de agua evaporada por unidad de peso de papel secado (base húmeda).

N = Número de secadores calentados por vapor que entran en contacto con la hoja.

A = Área de resma estándar, 1.0 m<sup>2</sup>.

$\Pi$  = 3.1416

D = Diámetro de los cilindros secadores, m.

L = porcentaje de sequedad (base húmeda) de la hoja que sale del último cilindro.

E = Porcentaje de sequedad (base húmeda) de la hoja que entra en el primer secador.

## CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA Y DESARROLLO DEL MODELO

### 3.1 MODELO DESCRIPTIVO

En el proceso de secado de papel los equipos principales que intervienen son los siguientes:

1.- El papel es transportado a través de los cilindros secadores por medio de lona secadora (banda permeable, de hilos sintéticos y/o naturales), la cual además de servir como transporte para el papel, ayuda al secado al presionar la hoja de papel sobre la superficie caliente del cilindro, (ver Figura 3. 1).

2.- Cilindro secador. Es un intercambiador de calor de doble naturaleza, es decir, es un condensador del vapor que entra al secador y un evaporador del agua contenida en el papel. La capacidad del cilindro secador para evaporar el agua depende de la temperatura de la superficie del secador y la capacidad del medio (atmósfera próxima al cilindro) en absorber y retirar los vapores de agua en el aire.

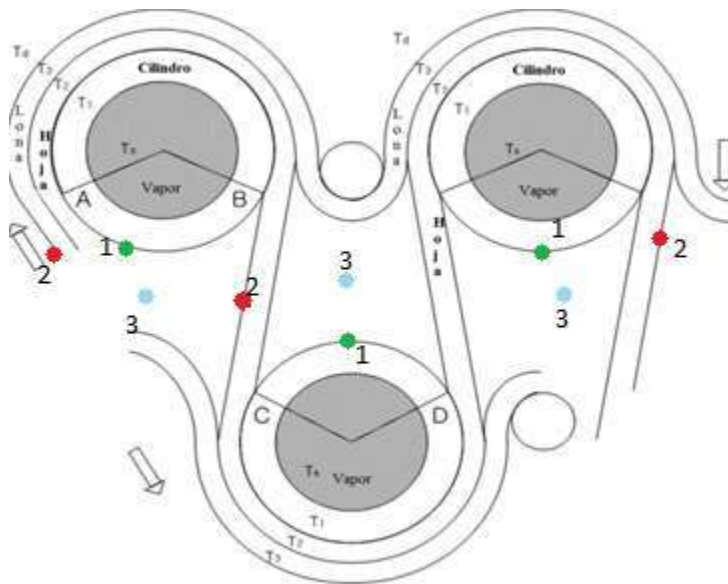


Figura 3. 1 Representación del paso de la hoja a través de la prensa.

Las tres primeras etapas de secado constan de un total de 35 cilindros secadores divididos en 4 grupos de la siguiente forma:

Tabla 3. 1 Configuración de los secadores en cada sección de secado.

<i>GRUPO</i>	<i>CILINDROS</i>
<b>1<sup>a</sup></b>	1,3 y 5
<b>1B</b>	7 y 10
<b>2</b>	9,11,12 y 13
<b>3</b>	14 a 21
<b>4</b>	22 a 35

Se utiliza un Pirómetro infrarrojo para medir las temperaturas de la superficie de los secadores y de la hoja de papel (puntos verde y rojo, respectivamente, de la Figura 3. 1); se tomarán tres mediciones de la hoja y del secador, en ambos extremos y en el centro. Calculando el promedio de estas tres mediciones, tomando ese resultado como valor de referencia. El pirómetro mide la temperatura de superficies mediante un rayo infrarrojo de forma no destructiva a larga distancia.

Para el valor de la temperatura de bulbo húmedo se utiliza un psicrómetro, el cual a través de un sensor, mide el valor de la temperatura y la humedad ambiental, con lo que determina el valor de la temperatura de bulbo húmedo, estas mediciones se realizarán en los puntos azules, de la Figura 3. 1. De igual manera se realizarán tres mediciones para posteriormente tomar como referencia el valor promedio.

Considerando como nuestro sistema de estudio, una porción plana de papel extendido en su medio de secado (cilindro secador) como una banda sin fin, moviéndose ambos a la misma velocidad. Se emplea la metodología desarrollada por González y González [12], para calcular la humedad del papel en el sistema de estudio de este trabajo de tesis.

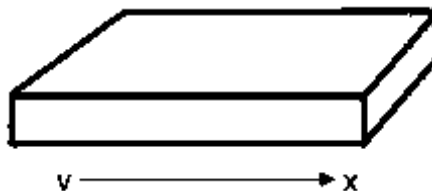


Figura 3. 2 Representación de la hoja de papel.

La metodología para el cálculo de humedad se explica bajo las siguientes consideraciones:

1.- El vector velocidad, sólo tiene dos componentes distintas de cero, la componente en el eje  $x$  y en el eje  $z$ , a las cuales denominamos  $u$  y  $w$  respectivamente, ambas constantes:  $\vec{v} = (u, 0, w)$ ,  $u$  y  $w$  *ctes.*

2.- La velocidad en el eje  $z$ :  $w \ll u$ , ambas positivas.

3.-  $u \leftarrow$  velocidad de desplazamiento del papel.

4.- La temperatura en cada punto del espacio en su medio de secado no depende del tiempo solo de  $x$  y de  $z$ .

5.- Supóngase que la temperatura es:  $T(x, z) = \tau(x) T(z)$

6.-  $\tau(x) \leftarrow$  conocida.

Tomando las consideraciones anteriores, la ecuación de la energía en la transferencia de calor [12] toma la forma:

$$(\rho C)_m \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho C_p)_f \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k_m \nabla^2 T \quad (3.1)$$

donde  $\partial T / \partial t = 0$

$$\rho_f = \rho_o [1 - \beta(T - T_o)] \quad (3.2)$$

Se tiene que

$$(\rho C_p)_f u T(z) \frac{d\tau}{dx} + (\rho C_p)_f w \tau(x) \frac{dT(z)}{dz} = k_m \nabla^2 T,$$

sustituyendo ecuación (3.2) en la ecuación anterior, se tiene

$$u \rho_o C_p [1 - \beta(\tau(x)T(z) - T_o)] T(z) \tau'(x) + w \rho_o C_p [1 - \beta(\tau(x)T(z) - T_o)] \tau(x) \frac{dT}{dz} = k_m \nabla^2 T$$

$$u \rho_o C_p \tau'(x) [1 - \beta \tau(x)T(z) + \beta T_o] T(z) + w \rho_o C_p \tau(x) [1 - \beta \tau(x)T(z) + \beta T_o] \frac{dT}{dz} = k_m \tau''(x) T(z) + k_m \tau(x) T''(z)$$

Haciendo

$$a = 1 + \beta T_0 \quad (3.3),$$

$$f_1(x) = u\rho_o C_p \tau'(x) \quad (3.4),$$

$$f_2(x) = w\rho_o C_p \tau(x) \quad (3.5).$$

Se tiene que

$$f_1(x)[a - \beta\tau(x)T(z)]T(z) + f_2(x)[a - \beta\tau(x)T(z)]\frac{dT}{dz} = k_m\tau''(x)T(z) + k_m\tau(x)T''(z) \quad (3.6),$$

$$af_1(x)T(z) + af_2(x)\frac{dT}{dz} = k_m\tau''(x)T(z) + k_m\tau(x)T''(z) \quad (3.7),$$

si se desprecia  $w$  se tiene la ecuación diferencial lineal homogénea

$$k_m\tau(x)T''(z) + (k_m\tau''(x) - af_1(x))T(z) = 0 \quad (3.8),$$

la cual tiene la ecuación característica

$$k_m\tau(x)r^2 + (k_m\tau''(x) - af_1(x)) = 0$$

cuyas raíces son

$$r_1 = -\frac{\sqrt{af_1 - k_m\tau''(x)}}{\sqrt{k_m\tau(x)}}$$

$$r_2 = \frac{\sqrt{af_1 - k_m\tau''(x)}}{\sqrt{k_m\tau(x)}}.$$

Dado que dichas raíces son reales, luego entonces la solución general de la ecuación homogénea es

$$T(z) = c_1 \text{Exp}[r_1 z] + c_2 \text{Exp}[r_2 z]$$

$$T(z) = \text{Exp}\left[\frac{-z\sqrt{af_1 - k_m\tau''(x)}}{\sqrt{k_m\tau(x)}}\right]c_1 + \text{Exp}\left[\frac{z\sqrt{af_1 - k_m\tau''(x)}}{\sqrt{k_m\tau(x)}}\right]c_2 \quad (3.9).$$



Para este caso, la temperatura en z disminuye por ende el segundo sumando de la ec. (3.9) se desprecia, entonces

$$T(z) = Exp \left[ \frac{-z\sqrt{af_1 - k_m\tau''(x)}}{\sqrt{k_m\tau(x)}} \right] c_1 \quad (3.10).$$

De la Ley de Darcy y siguiendo el método descrito por González y González se tienen las siguientes ecuaciones:

$$w = -\frac{K}{\mu}(\nabla P - \rho_f g) \quad (3.11).$$

$$\nabla P = -\rho_o g[1 - \beta(T - T_o)] \quad (3.12).$$

$$w = \frac{2K\rho_f g}{\mu} \quad (3.13).$$

Conociendo w podemos calcular la humedad de la siguiente forma:

$$\mathcal{H} = \frac{w}{u} L \quad (3.14),$$

Donde  $\mathcal{H}$  es la distancia que recorre una molécula de agua a lo largo del eje z mientras se desplaza una distancia L, y esta última es la distancia que recorre el papel en su trayectoria por los 35 secadores que componen las 3 etapas de secado.

Finalmente, el porcentaje de humedad en este punto será:

$$\text{humedad} = \frac{z - \mathcal{H}}{z} * 100$$

Con las mediciones de las temperaturas de la hoja, secador y el aire en los 35 secadores de la pre-sequería de la máquina de papel. Se realizan los cálculos de las variables descritas en el capítulo 2. Estas son: la humedad relativa, la humedad absoluta, la presión de vapor, la fuerza motriz, la tasa de secado y la humedad del papel.

## CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 MEDICIONES Y ESTUDIO DE LAS SECCIONES DE SECADO

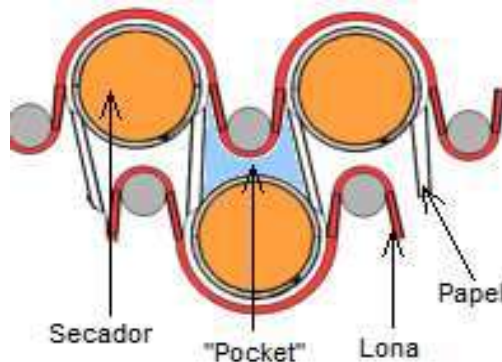
El análisis de humedad en las secciones de secado es un camino para evaluar la eficiencia de secado en una máquina de papel. Este análisis examina los factores básicos involucrados en el secado de la hoja de papel. En este análisis se miden las siguientes variables:

- a. Temperatura de la superficie de los cilindros secadores.
- b. Temperatura de la hoja de papel a la salida de cada secador.
- c. Temperatura de bulbo seco y húmedo en cada “pocket”.

Analizando estos valores y correlacionándolos se obtienen las siguientes graficas:

- a. Variación de la temperatura de la superficie en las secciones de secado.
- b. Variación de la temperatura en la hoja de papel en las secciones de secado.
- c. Humedad dentro de los “pockets”.

Un “pocket” o “bolsillo” es el área comprendida que se localiza arriba o debajo de un cilindro secador, el número de “pocket” se designa por el número del cilindro sobre o bajo el cual se encuentre. Figura 4. 1.



*Figura 4. 1 Zona de la sección de secado denominada como “pocket”.*

Se miden las condiciones de operación en dirección máquina de las secciones de secado a través de mediciones puntuales, desde la orilla de lado de servicio, al centro y en la orilla de lado transmisión del tren de secadores.

## 4.2 RESULTADOS PARA EL KROMOS GRÁFICO

La fabricación a la hora del muestro refiere a:

*Tabla 4. 1 Datos técnicos de la fabricación del papel*

<i>Papel</i>	Kromos gráfico
<i>Composición</i>	32% fibra larga
	45% fibra corta
	23% merma
	18% cenizas
<i>Peso base</i>	68 gr/m <sup>2</sup>
<i>Velocidad</i>	540 m/min
<i>Ancho de hoja en enrollador</i>	4.35 m
<i>Consistencia a la entrada a secado</i>	37.8 %
<i>Humedad de la hoja en el enrollador</i>	4.8 %
<i>Producción teórica</i>	9.58 ton/hr
<i>Presión de vapor promedio</i>	1.91 kg/cm <sup>2</sup>
<i>Flujo total de vapor consumido</i>	30 ton/hr

Estos datos son registrados en los equipos de control del proceso en la máquina de papel.

4.2.1 Perfil de temperatura de la superficie de los cilindros y de la hoja a la salida de cada secador.

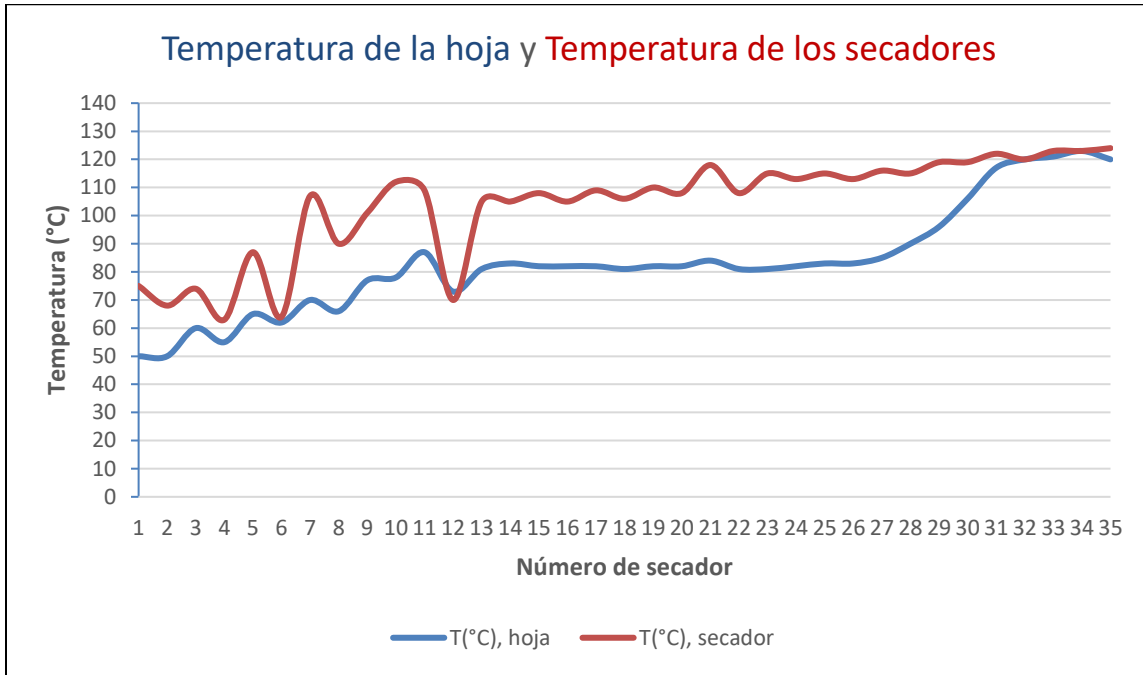
Por disposición en planta, se determinó dejar fuera de servicio los secadores 2, 4, 6 y 8, es decir, no cuentan con suministro de vapor de acuerdo al arreglo operacional del sistema de control, razón por la cual no se listan en la Tabla 3. 1.

De las mediciones realizadas se obtienen los siguientes datos:

*Tabla 4.2 Perfil de temperatura en las 3 primeras etapas de secado.*

<i>Secador</i>	<i>Temperatura de secador (°C)</i>	<i>Temperatura de la hoja (°C)</i>
1	75	50
2	68	50
3	74	60
4	63	55
5	87	65
6	64	62
7	107	70
8	90	66
9	101	77
10	112	78
11	109	87
12	70	73
13	105	81
14	105	83
15	108	82
16	105	82
17	109	82
18	106	81
19	110	82
20	108	82
21	118	83
22	108	81
23	115	81
24	113	82
25	115	83
26	113	83
27	116	85
28	115	90
29	119	96
30	119	106
31	122	117
32	120	120
33	123	121
34	123	123
35	124	120

Los secadores 2, 4, 6, 8 y 12 se encuentran sin suministro de vapor, razón por la cual la temperatura es más baja en dichos puntos, respecto a su secador anterior.



Gráfica 4. 1 Temperatura de la hoja y de los secadores en cada uno.

Comparando la temperatura de los secadores con la temperatura de la hoja podemos notar la alta influencia de un secador frío, y así también, si la diferencia de temperatura es mayor a 20 °C es indicativo de que no hay un íntimo contacto de la hoja con los secadores. En este caso se puede notar que en casi todos los secadores hay una diferencia de temperatura entre la hoja y los secadores por arriba del parámetro. Entre las posibles causas de esta situación son una baja tensión en las lonas y alta humedad en los “pockets” que están originando el enfriamiento de la hoja.

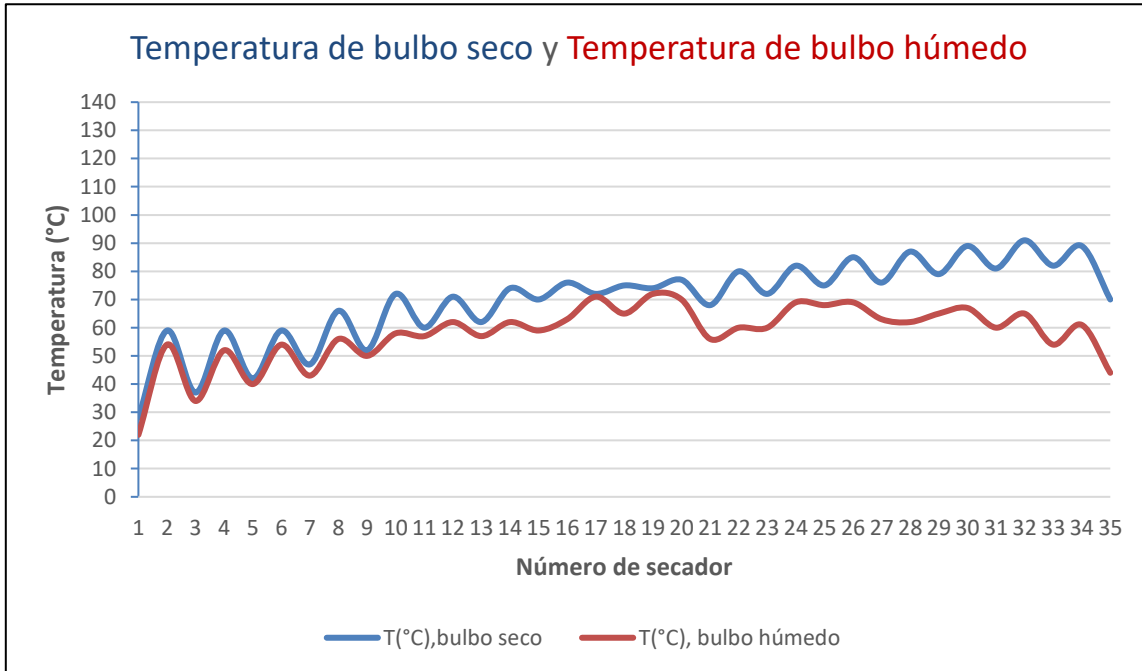
#### 4.2.2 Perfil de temperatura de bulbo seco y húmedo en cada “pocket”.

Se toman mediciones de las temperaturas de bulbo seco y de bulbo húmedo, en el aire dentro de cada bolsillo o pocket de los 35 secadores.

Los datos muestreados de estas temperaturas se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 4. 3 Perfil de temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo.

<i>Secador</i>	<i>Temperatura de bulbo seco (°C)</i>	<i>Temperatura de bulbo húmedo (°C)</i>
1	28	22
2	59	54
3	37	34
4	59	52
5	42	40
6	59	54
7	47	43
8	66	56
9	52	50
10	72	58
11	60	57
12	71	62
13	62	57
14	74	62
15	70	69
16	76	63
17	72	71
18	75	65
19	74	72
20	77	70
21	68	56
22	80	60
23	72	60
24	82	69
25	75	68
26	85	69
27	76	63
28	87	62
29	79	65
30	89	67
31	81	60
32	91	65
33	82	54
34	89	61
35	57	44



Gráfica 4. 2 Temperatura de bulbo seco y temperatura de bulbo húmedo en cada “pocket”.

Los perfiles de temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo se comportan variables en todos los secadores. En promedio la temperatura de bulbo seco fue 69.65 °C mientras la temperatura de bulbo húmedo fue 57.82 °C, para una diferencia de 11.82 °C. (Gráfica 4. 22)

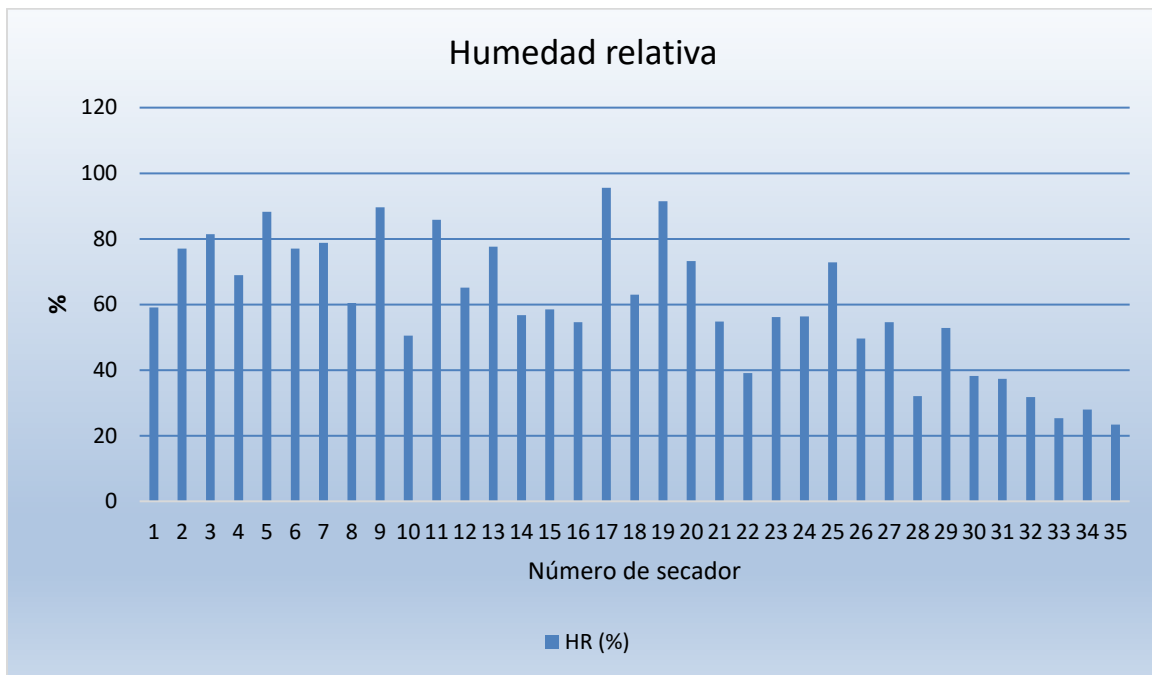
#### 4.2.3 Humedad relativa.

Con las mediciones de las temperaturas de bulbo seco y de bulbo húmedo, se calcula la humedad relativa en cada pocket. Sustituyendo estos datos en las ecuaciones 2.15.2, 2.15.3 y 2.15.4. Los resultados se muestran en la siguiente Tabla 4. 4 y en la Gráfica 4. 3.

Tabla 4. 4 Datos y resultados del cálculo de la humedad relativa.

Secador	$T_{\text{bulbo seco}} (^{\circ}\text{K})$	$T_{\text{bulbo húmedo}} (^{\circ}\text{K})$	$e_s(T)$	$e_s(T_w)$	$e(T)$	$HR (\%)$
1	301.15	295.15	3782.88	2645.18	2233.59	59.04
2	332.15	327.15	19041.11	15022.16	14666.86	77.03
3	310.15	307.15	6282.15	5324.90	5116.34	81.44
4	332.15	325.15	19041.11	13631.14	13134.80	68.98
5	315.15	313.15	8209.47	7384.82	7244.86	88.25
6	332.15	327.15	19041.11	15022.16	14666.86	77.03
7	320.15	316.15	10626.46	8650.75	8369.89	78.76
8	339.15	329.15	26182.35	16532.79	15820.66	60.42
9	325.15	323.15	13631.14	12351.90	12210.40	89.58
10	345.15	331.15	33998.39	18171.26	17172.12	50.51
11	333.15	330.15	19946.19	17335.52	17121.65	85.84
12	344.15	335.15	32573.55	21866.63	21221.55	65.15
13	335.15	330.15	21866.63	17335.52	16979.07	77.65
14	347.15	335.15	37006.35	21866.63	21006.53	56.76
15	343.15	332.15	31199.48	19041.11	18255.22	58.51
16	349.15	336.15	40235.59	22884.36	21951.58	54.56
17	345.15	344.15	33998.39	32573.55	32501.18	95.60
18	348.15	338.15	38592.53	25040.95	24321.89	63.02
19	347.15	345.15	37006.35	33998.39	33853.50	91.48
20	350.15	343.15	41937.14	31199.48	30693.45	73.19
21	341.15	329.15	28597.89	16532.79	15678.23	54.82
22	353.15	333.15	47409.25	19946.19	18515.76	39.06
23	345.15	333.15	33998.39	19946.19	19087.93	56.14
24	355.15	342.15	51380.58	29874.74	28935.96	56.32
25	348.15	341.15	38592.53	28597.89	28092.94	72.79
26	358.15	342.15	57858.04	29874.74	28719.32	49.64
27	349.15	336.15	40235.59	22884.36	21951.58	54.56
28	360.15	335.15	62544.99	21866.63	20074.75	32.10
29	352.15	338.15	45522.29	25040.95	24034.27	52.80
30	362.15	340.15	67544.91	27367.55	25782.24	38.17
31	354.15	333.15	49361.42	19946.19	18444.24	37.37
32	364.15	338.15	72873.85	25040.95	23171.40	31.80
33	355.15	327.15	51380.58	15022.16	13032.48	25.36
34	362.15	334.15	67544.91	20887.64	18882.89	27.96
35	343.15	317.15	31199.48	9112.31	7284.75	23.35





Gráfica 4. 3 Humedad relativa al interior de los “pockets”.

Los resultados de la humedad relativa muestran que en el interior de los “pockets” está predominando la fase líquida. En promedio se obtuvo un valor de 60.14 %. Lo recomendable es tener valores bajos en todos los “pockets”, inferiores a 50%. Dichos resultados muestran que efectivamente la alta humedad en los “pockets” es una causa del enfriamiento de la hoja.

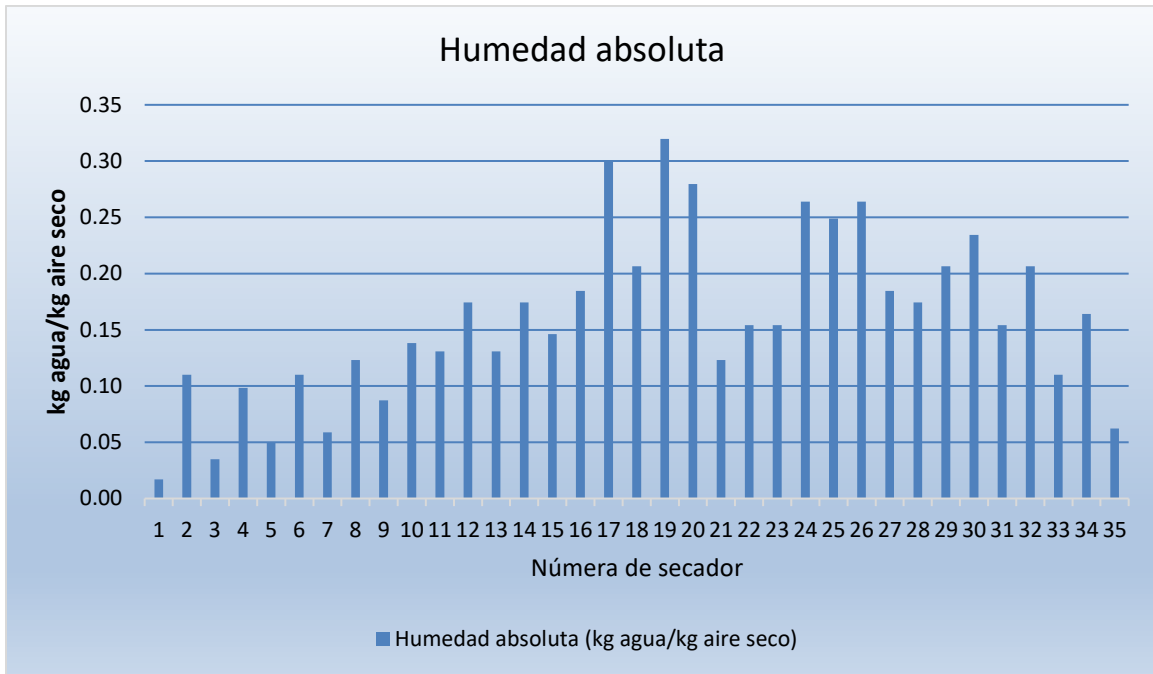
#### 4.2.4 Humedad absoluta.

De las tablas de vapor se extraen los datos de las presiones de vapor para cada una de las temperaturas de bulbo húmedo y finalmente se obtiene la humedad absoluta en cada “pocket”. Sustituyendo los datos en la ecuación 2.15.5.

A continuación, se muestran estos resultados.

Tabla 4. 5 Datos y resultados del cálculo de la humedad absoluta.

<b>Secador</b>	<i>T bulbo húmedo</i> (°C)	$P_v$ (Pa)	<i>HA</i> (kg agua/kg aire seco)
1	22	2642	0.01686
2	54	15058	0.10993
3	34	5318	0.03489
4	52	13694	0.09842
5	40	7375	0.04944
6	54	15058	0.10993
7	43	8649	0.05878
8	56	16576	0.12318
9	50	12330	0.08726
10	58	18248	0.13834
11	57	17412	0.13068
12	62	21956	0.17422
13	57	17412	0.13068
14	62	21956	0.17422
15	59	19084	0.14614
16	63	22974	0.18467
17	71	32638	0.29926
18	65	25010	0.20640
19	72	34116	0.31969
20	70	31160	0.27969
21	56	16576	0.12318
22	60	19920	0.15411
23	60	19920	0.15411
24	69	29930	0.26402
25	68	28700	0.24888
26	69	29930	0.26402
27	63	22974	0.18467
28	62	21956	0.17422
29	65	25010	0.20640
30	67	27470	0.23425
31	60	19920	0.15411
32	65	25010	0.20640
33	54	15058	0.10993
34	61	20938	0.16404
35	44	9100	0.06214



Gráfica 4. 4 Humedad absoluta al interior de los “pockets”.

La gráfica de humedad absoluta en los “pockets” indica la cantidad de humedad en el interior de los “pockets”, encontrando que hay muchos “pockets” que están por arriba del parámetro que indica TAPPI (Gráfica 4. 4) [13]. La recomendación es tener un valor por debajo de 0.20 kg agua/kg aire seco.

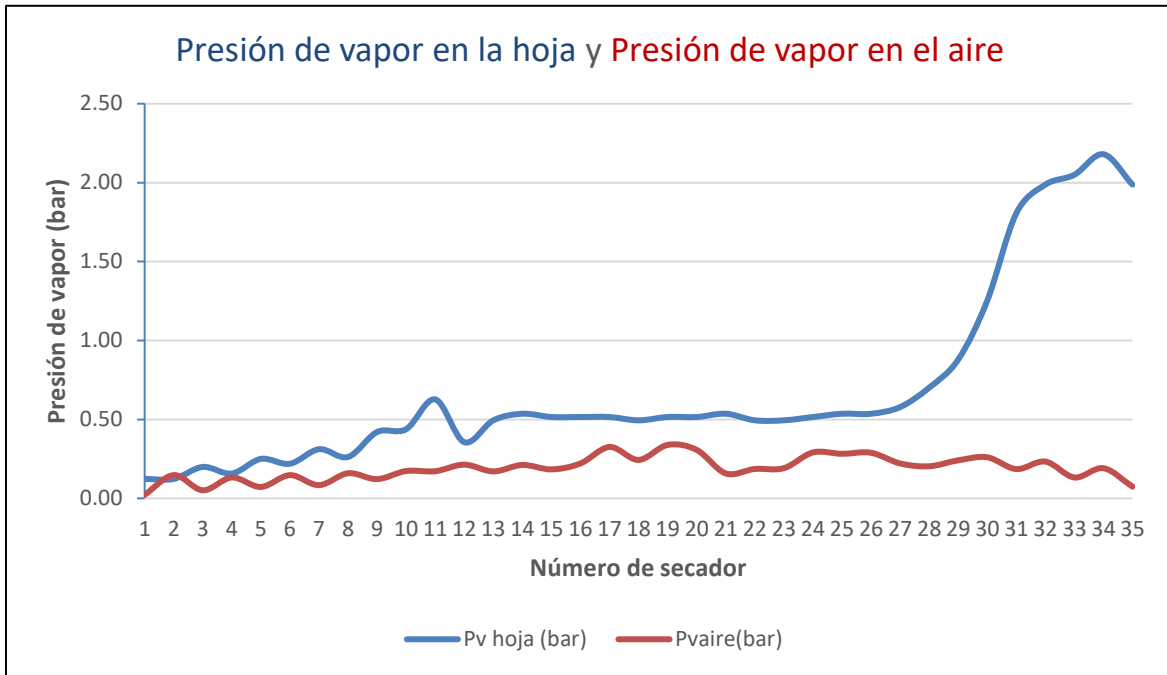
#### 4.2.5 Presión de vapor

La presión de vapor de la hoja se obtiene de las tablas de vapor saturado para las temperaturas medidas en la hoja y en los pockets, para cada uno de los secadores.

Utilizando la ec. (2.15.6) y sustituyendo valores se obtienen los siguientes resultados.

Tabla 4. 6 Datos de las presiones de vapor en la hoja y en el aire al interior de los “pockets”.

Secador	T bulbo seco (°C)	T Hoja (°C)	P <sub>v</sub> hoja (bar)	T <sub>bh</sub> (°C)	P <sub>vs,bh</sub> (bar)	P <sub>v</sub> aire (bar)
1	28	50	0.1233	22	0.0264	0.0225416
2	59	50	0.1233	54	0.1506	0.147348
3	37	60	0.1992	34	0.0532	0.0512408
4	59	55	0.1574	52	0.1369	0.1324152
5	42	65	0.2501	40	0.0738	0.0724572
6	59	62	0.2196	54	0.1506	0.147348
7	47	70	0.3116	43	0.0865	0.0839044
8	66	66	0.2624	56	0.1658	0.159296
9	52	77	0.4207	50	0.1233	0.1220072
10	72	78	0.4384	58	0.1825	0.1734304
11	60	87	0.6272	57	0.1741	0.1721808
12	71	73	0.3559	62	0.2196	0.2137424
13	62	81	0.4945	57	0.1741	0.170888
14	74	83	0.5362	62	0.2196	0.2118032
15	70	82	0.5154	59	0.1908	0.1837296
16	76	82	0.5154	63	0.2297	0.2213368
17	72	82	0.5154	71	0.3264	0.3257336
18	75	81	0.4945	65	0.2501	0.243636
19	74	82	0.5154	72	0.3400	0.3387072
20	77	82	0.5154	70	0.3116	0.3070752
21	68	83	0.5362	56	0.1658	0.1580032
22	80	81	0.4945	60	0.1992	0.186272
23	72	81	0.4945	60	0.1992	0.1914432
24	82	82	0.5154	69	0.2993	0.2908968
25	75	83	0.5362	68	0.2870	0.2824752
26	85	83	0.5362	69	0.2993	0.2889576
27	76	85	0.5780	63	0.2297	0.2213368
28	87	90	0.7011	62	0.2196	0.2034
29	79	96	0.8789	65	0.2501	0.2410504
30	89	106	1.2522	67	0.2747	0.2604792
31	81	117	1.8059	60	0.1992	0.1856256
32	91	120	1.9875	65	0.2501	0.2332936
33	82	121	2.0500	54	0.1506	0.1324808
34	89	123	2.1800	61	0.2094	0.1912808
35	57	120	1.9875	44	0.0910	0.0741936



Gráfica 4. 5 Presiones de vapor en la hoja y en el aire al interior de los “pockets”.

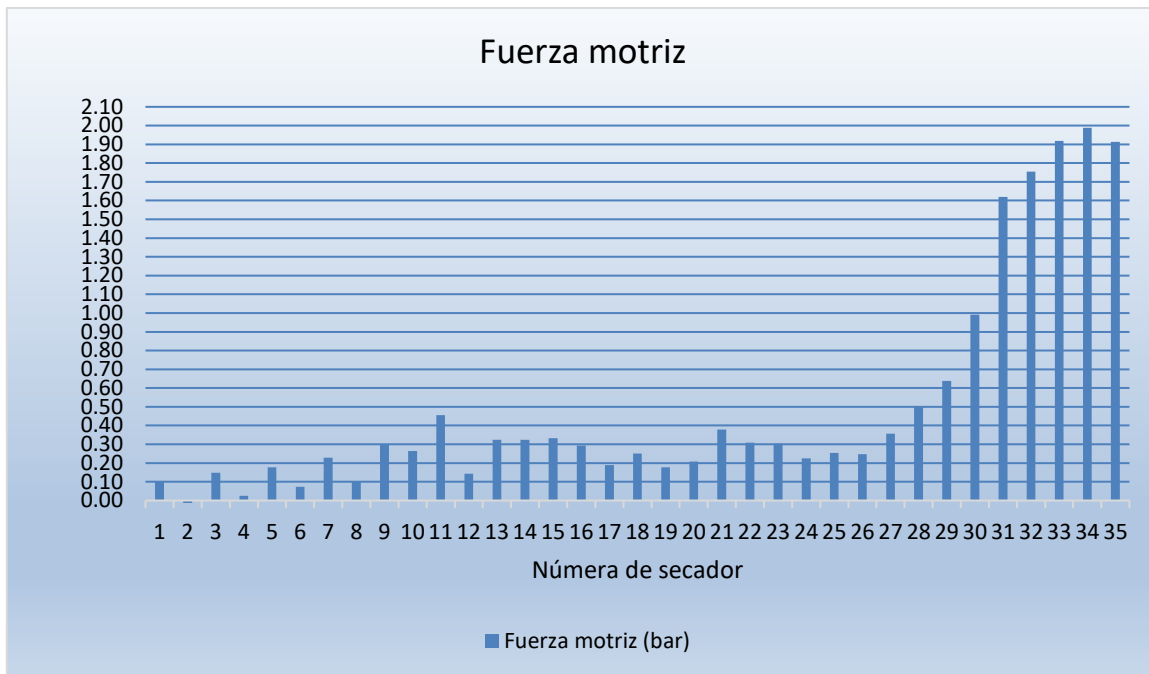
Las presiones de vapor en la hoja y en el aire en el interior de los “pockets” son diferentes. Los valores de presión de vapor del aire son altos, esto puede ser por una deficiente ventilación de los “pockets”.

#### 4.2.6 Fuerza motriz

En la siguiente tabla y gráfica, se muestran los resultados de los cálculos de la fuerza motriz en cada uno de los “pockets”. Obtenidos a partir de las ecuaciones 2.15.7.

*Tabla 4. 7 Fuerza motriz.*

<b>Secador</b>	<b>P<sub>v</sub> hoja (bar)</b>	<b>P<sub>v</sub> aíre (bar)</b>	<b>Fuerza motriz (bar)</b>
1	0.1233	0.0225416	0.1008
2	0.1233	0.147348	-0.0240
3	0.1992	0.0512408	0.1480
4	0.1574	0.1324152	0.0250
5	0.2501	0.0724572	0.1776
6	0.2196	0.147348	0.0722
7	0.3116	0.0839044	0.2277
8	0.2624	0.159296	0.1031
9	0.4207	0.1220072	0.2987
10	0.4384	0.1734304	0.2649
11	0.6272	0.1721808	0.4551
12	0.3559	0.2137424	0.1422
13	0.4945	0.170888	0.3236
14	0.5362	0.2118032	0.3244
15	0.5154	0.1837296	0.3316
16	0.5154	0.2213368	0.2940
17	0.5154	0.3257336	0.1896
18	0.4945	0.243636	0.2508
19	0.5154	0.3387072	0.1767
20	0.5154	0.3070752	0.2083
21	0.5362	0.1580032	0.3782
22	0.4945	0.186272	0.3082
23	0.4945	0.1914432	0.3030
24	0.5154	0.2908968	0.2245
25	0.5362	0.2824752	0.2538
26	0.5362	0.2889576	0.2473
27	0.5780	0.2213368	0.3567
28	0.7011	0.2034	0.4977
29	0.8789	0.2410504	0.6378
30	1.2522	0.2604792	0.9917
31	1.8059	0.1856256	1.6203
32	1.9875	0.2332936	1.7542
33	2.0500	0.1324808	1.9175
34	2.1800	0.1912808	1.9887
35	1.9875	0.0741936	1.9133



Gráfica 4. 6 Fuerza motriz en el secado del papel.

Los parámetros para definir la eficiencia del secado a partir de la fuerza motriz son: Baja, para una fuerza motriz menor a 0.27 bar. Buena, si el rango es entre 0.27 y 0.54 bar. Optima, si es superior a 0.54 bar. De acuerdo a los resultados mostrados en la Tabla 4. 7 , en promedio se tiene una fuerza motriz de 0.49 bar, por lo que se encuentra en el rango de una eficiencia aceptable.

#### 4.2.7 Tasa de secado

Se calcula la tasa de secado a partir de las ecuaciones 2.16.1 y 2.16.2 donde se sustituyen los siguientes datos.

L=95.2 % de abandono en seco

E= 37.8 % de consistencia a la entrada del secador

S= 540 m/min

B= 68 g/m<sup>2</sup>

M= 1.518

N= 35 cilindros

A= 1 m<sup>2</sup> (valor tomado de la bibliografía [13])

D= 1.524 m

$$M = \frac{95.2}{37.8} - 1 = 1.518$$

$$R_W = 60 \frac{(540 \frac{m}{\min}) (68 \frac{g}{m^2}) (1.518)}{(35 \text{ cilindros}) (1 m^2) \pi (1.524 m)}$$

$$R_W = 19.964 \text{ kg de agua/h m}^2$$

#### 4.2.8 Calculo de la humedad

Siguiendo el metodo descrito en el capítulo 3, desarrollado por González y González [12] se realizan los cálculos correspondientes para obtener la humedad del papel Kromos Gráfico, al final de las etapas de pre-secado en la máquina de papel de Biopapel Scribe, Morerlia.

Para conocer la humedad al final de la tercera etapa de secado es necesario conocer la temperatura en Z dada por la ecuación (3.10)

$$T(z) = Exp \left[ \frac{-z \sqrt{af_1 - k_m \tau''(x)}}{\sqrt{k_m \tau(x)}} \right] c_1$$

donde

z ← calibre del papel, para el caso del papel en cuestión se tiene que:

$$z = 8.80 \times 10^{-5} \text{ m}$$

De la ecuación (3.3)

$$a = 1 + \beta T_0$$

donde

$$\beta = - \frac{\rho_s - \rho_e}{\rho(T_s - T_e)}$$

donde ρ es la densidad del fluido, para este caso el agua, a la entrada y salida del sistema es decir en el primer y último secador. De tablas para el agua a 1 atm de presión externa y a 25 °C la ρ = 997.10 kg/m<sup>3</sup>, además se tiene que para:



$$T_e = 50 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow \rho_e = 988.02 \text{ kg/m}^3$$

$$T_s = 120 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow \rho_s = 939.20 \text{ kg/m}^3$$

con lo cual podemos calcular el coeficiente de expansión térmica

$$\beta = -\frac{(939.20 - 988.02)\text{kg/m}^3}{997.10 \text{ kg/m}^3(120 - 50)^\circ\text{C}}$$

$$\beta = 6.99 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

Con el valor anterior podemos encontrar el valor de  $a$

$$a = 1 + 6.99 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} (50^\circ\text{C})$$

$$a = 1.03$$

Ahora de la ecuación (3.4)

$$f_1(x) = u \rho_o C_p \tau'(x)$$

de donde

Velocidad de la máquina:  $u = 540 \text{ m/min}$

Densidad del agua a  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ :  $\rho_o = 988.02 \text{ kg/m}^3$

Calor específico del hierro fundido (material del que se compone el secador) [14]

$$C_p = 500 \text{ J/kg }^\circ\text{C} = 1.824 \text{ J/kg }^\circ\text{K}$$

De la interpolación del perfil de temperatura en el último secador (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** A),  $\tau(x) = 120 \text{ }^\circ\text{C} = 393.15 \text{ }^\circ\text{K}$  se tiene que

$$\tau'(x) = -7.5 \text{ }^\circ\text{C} = 265.65 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$\tau''(x) = -11 \text{ }^\circ\text{C} = 262.15 \text{ }^\circ\text{K}$$

Por tanto

$$f_1 = (540\text{m/min})(988.02 \text{ kg/m}^3)(1.824 \text{ J/kg }^\circ\text{K})(265.65^\circ\text{K}) (1\text{min}/60\text{seg})$$

$$f_1 = 4.31 \times 10^6 \text{ J/m}^2 \text{ seg}$$

$$f_1 = 4.31 \times 10^6 \text{ W/m}^2$$

El coeficiente de conductividad térmica global [14] es:

$$K_m = 2000 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{K}.$$

Sustituyendo datos en la ecuación (3.10) se tiene:

$$T(z) = \text{Exp} \left[ \frac{-8.8 \times 10^{-5} \sqrt{1.03(4.31 \times 10^6) - 2000(262.15)}}{\sqrt{2000(393.15)}} \right] c_1$$

$$T(z) = 0.99 c_1,$$

donde  $c_1$  es la temperatura de la superficie del secador 35, que es donde se desea determinar la humedad de la hoja:

$$c_1 = 124 \text{ }^\circ\text{C},$$

por lo tanto

$$T(z) = 123.97 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Ahora para conocer la velocidad de desplazamiento del agua al interior de la hoja en su eje  $z$ , es decir,  $w$ , es necesario conocer la distancia que total que recorre la hoja de papel durante su paso por las 3 secciones de secado.

La banda de papel corre a través de cada secador cubriendo la mitad de su circunferencia.

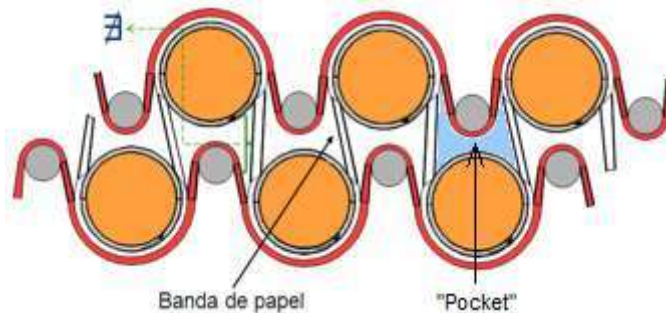


Figura 4. 2 Esquema del recorrido del papel a través de los secadores.

Los secadores tienen 2 m (60 in.) de diámetro ( $\phi$ ), por lo tanto, el espacio del secador que es recorrido por la banda de papel es:

$$\frac{1}{2}\ell = \pi \left(\frac{\phi}{2}\right) = 3.1416 \left(\frac{2}{2}\right) = 3.1416 \text{ m}$$

Entre cada secador existe un espacio libre del recorrido de la banda de papel ( $\mathcal{A}$ ) de 1m (Figura 4. 2), sumando un total de 36m de espacios libres desde que sale de la 2da. prensa húmeda hasta que abandona el secador 35, el cual es el último secador de la 3ra. etapa de secado. Por lo que la distancia total que recorre la banda de papel desde la salida de la 2da. prensa húmeda hasta la salida de la 3ra. sección de secado es:

$$L = \ell(35) + \mathcal{A} = 3.1416m(35) + (36m) = 145.96m$$

Con lo que el tiempo que tarda en recorrer la banda de papel las 3 primeras etapas de secado es:

$$t = \frac{L}{u} = \frac{145.96}{540} = 0.27 \text{ min}(60\text{seg}/1\text{min}) = 16.22 \text{ seg}$$

De la ecuación (3.2)

$$\rho_f = \rho_o[1 - \beta(T - T_o)]$$

donde  $T = T(z) = 123.97 \text{ }^\circ\text{C}$

luego entonces

$$\rho_f = 988.02 \text{ kg/m}^3[1 - 6.99 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} (123.97 \text{ }^\circ\text{C} - 50 \text{ }^\circ\text{C})]$$
$$\rho_f = 936.89 \text{ kg/m}^3$$

De tablas se tiene que el coeficiente de viscosidad dinámica del agua

$$\mu = 0.0003 \text{ kg/m seg}$$

La permeabilidad específica del medio, es decir, del papel es muy pequeña y depende de su gramaje:

$$K = 8.65 \times 10^{-14} \text{ m}^2$$

La gravedad

$$g = 9.8 \text{ m/seg}^2$$

Por lo tanto sustituyendo datos en la ecuación (3.13)

$$w = \frac{2K\rho_f g}{\mu} = \frac{2(8.65 \times 10^{-14} \text{ m}^2)(936.89 \text{ kg/m}^3)(9.8 \frac{\text{m}}{\text{seg}^2})}{0.0003 \frac{\text{kg}}{\text{m seg}}}$$
$$w = 3.17 \times 10^{-4} \text{ m/seg}$$

Con lo cual la humedad (de la ec. 3.14) al final de la tercera etapa de secado será:

$$\mathcal{H} = \frac{w}{u} L = 8.58 \times 10^{-5} \text{ m}$$

Finalmente el porcentaje de humedad en este punto es:

$$\text{humedad} = \frac{z - \mathcal{H}}{z} * 100 = \frac{8.80 \times 10^{-5} \text{ m} - 8.58 \times 10^{-5} \text{ m}}{8.80 \times 10^{-5} \text{ m}} * 100$$

$$\text{humedad} = 2.42 \%$$

Este resultado es muy cercano al porcentaje de humedad registrado (2.3%) en dicha zona del proceso, por el sistema de monitoreo utilizado en la fábrica, que consta de un escáner (Figura 4. 3) que realiza un barrido a todo lo ancho de la hoja midiendo y/o registrando el porcentaje de humedad y transfiere el dato a la PC de control. Por lo tanto, que se puede aseverar que el modelo matemático es confiable y acertado.



*Figura 4. 3 Escáner de monitoreo y registro de la humedad en el papel.*

### 4.3 RESULTADOS PARA EL FOTOBOND

Siguiendo la misma metodología y procedimientos en la sección 4.2, se realiza el estudio de secado ahora para un papel de 75 gr/m<sup>2</sup> denominado Fotobond.

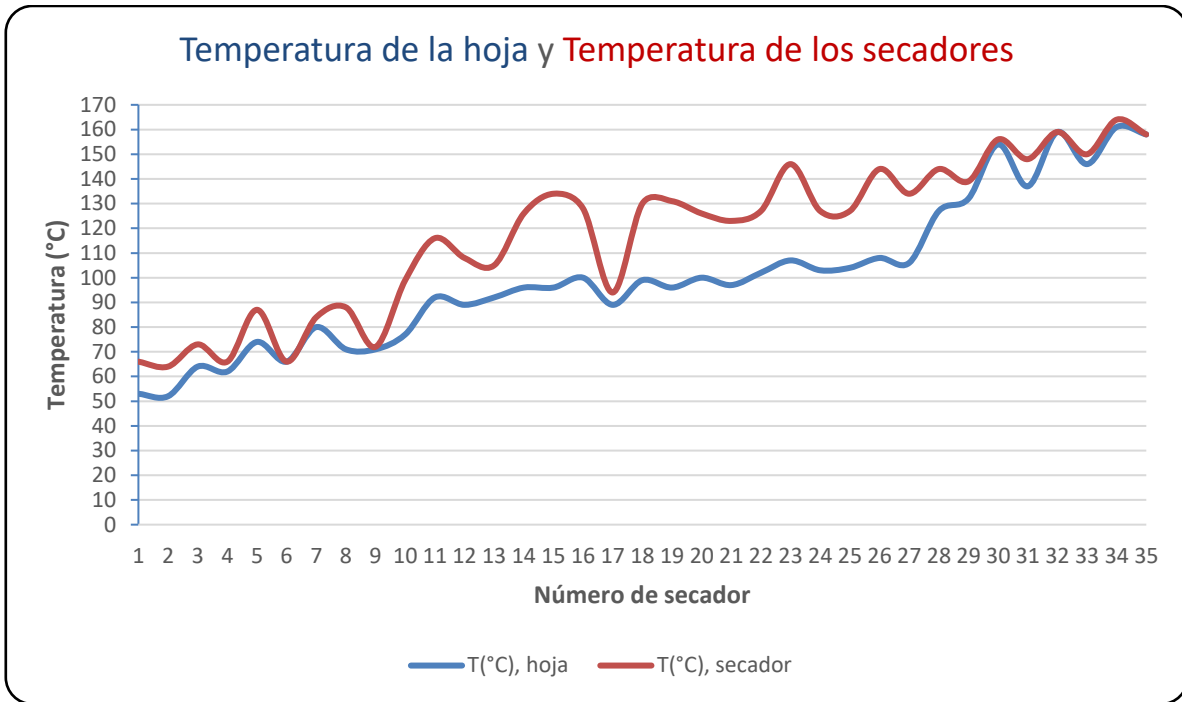
*Tabla 4. 8 Datos técnicos de la fabricación del papel.*

<i>Papel</i>	Fotobond
<i>Composición</i>	33% fibra larga
	50% fibra corta
	17% merma
	22.5% cenizas
<i>Peso base</i>	75 gr/m <sup>2</sup>
<i>Velocidad</i>	520 m/min
<i>Ancho de hoja en enrollador</i>	4.42 m
<i>Consistencia a la entrada a secado</i>	42 %
<i>Humedad de la hoja en el enrollador</i>	3.8 %
<i>Producción teórica</i>	10.34 ton/hr
<i>Presión de vapor promedio</i>	2.58 kg/cm <sup>2</sup>
<i>Flujo total de vapor consumido</i>	30 ton/hr

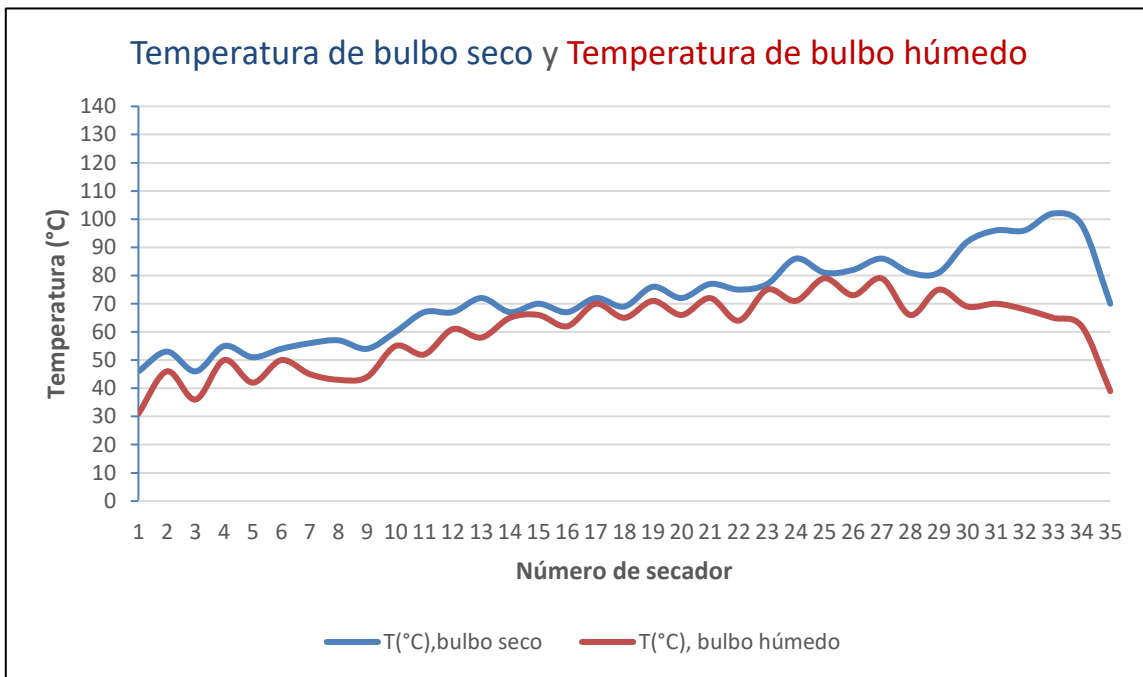
A continuación se muestran en una tabla las mediciones y resultados de las mismas condiciones y variables consideradas para el Kromos de 68 gr/m<sup>2</sup> pero ahora aplicadas al Fotobond 75 gr/m<sup>2</sup>, así como las gráficas representativas de las variaciones de temperaturas, humedades, presiones de vapor y fuerza motriz.

Tabla 4. 9 Datos, mediciones y resultados del estudio de secado para Fotobond 75 gr/m<sup>2</sup>.

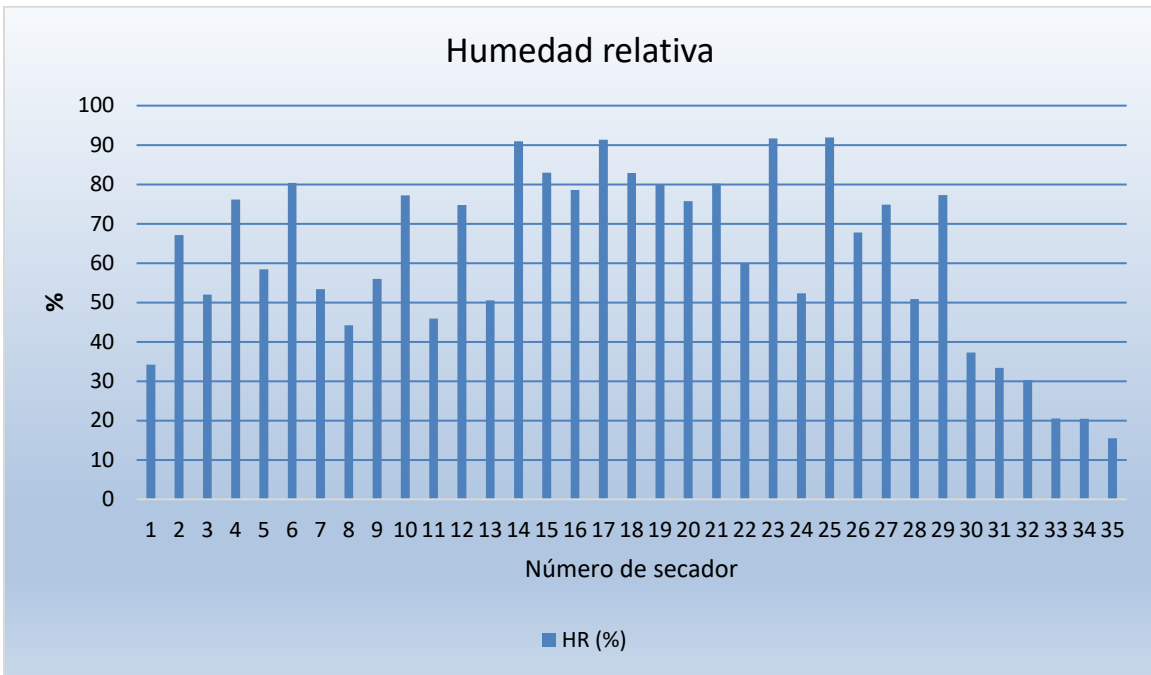
No. Secador	Temperatura (°C)				Humedad Relativa (%)	Humedad Absoluta (kg agua/kg aire seco)	Presión de vapor (bar)		
	Hoja	Secador	Bulbo seco	Bulbo húmedo			Hoja	Aire	Fuerza motriz
1	53	66	46	31	34.23	0.02927	0.14	0.035	0.11
2	52	64	53	46	67.12	0.06965	0.14	0.096	0.04
3	64	73	46	36	51.99	0.03922	0.24	0.053	0.19
4	62	66	55	50	76.12	0.08726	0.22	0.120	0.10
5	74	87	51	42	58.39	0.05544	0.37	0.076	0.29
6	66	66	54	50	80.34	0.08726	0.26	0.121	0.14
7	80	84	56	45	53.35	0.06588	0.47	0.089	0.38
8	71	88	57	43	44.23	0.05878	0.33	0.077	0.25
9	71	72	54	44	55.98	0.06214	0.33	0.085	0.24
10	77	99	60	55	77.24	0.11583	0.42	0.154	0.27
11	92	116	67	52	45.92	0.09842	0.76	0.127	0.63
12	89	108	67	61	74.75	0.16404	0.68	0.206	0.47
13	92	105	72	58	50.51	0.13834	0.76	0.173	0.59
14	96	126	67	65	90.97	0.20640	0.88	0.249	0.63
15	96	134	70	66	83.00	0.22010	0.88	0.260	0.62
16	100	128	67	62	78.59	0.17422	1.01	0.216	0.80
17	89	94	72	70	91.34	0.27969	0.68	0.310	0.37
18	99	130	69	65	82.86	0.20640	0.98	0.248	0.73
19	96	131	76	71	80.06	0.29926	0.88	0.323	0.56
20	100	126	72	66	75.74	0.22010	1.01	0.259	0.75
21	97	123	77	72	80.21	0.31969	0.91	0.338	0.57
22	102	127	75	64	59.99	0.19539	1.09	0.233	0.86
23	107	146	77	75	91.68	0.38676	1.30	0.384	0.92
24	103	127	86	71	52.34	0.29926	1.13	0.317	0.81
25	104	127	81	79	91.93	0.51533	1.17	0.455	0.71
26	108	144	82	73	67.77	0.34104	1.34	0.350	0.99
27	106	134	86	79	74.82	0.51533	1.25	0.451	0.80
28	127	144	81	66	50.85	0.22010	2.50	0.253	2.25
29	132	139	81	75	77.30	0.38676	2.90	0.382	2.52
30	154	156	92	69	37.29	0.26402	5.30	0.284	5.01
31	137	148	96	70	33.41	0.27969	3.32	0.295	3.03
32	159	159	96	68	30.29	0.24888	6.03	0.269	5.76
33	146	150	102	65	20.56	0.20640	4.28	0.226	4.05
34	161	164	98	62	20.44	0.17422	2.18	0.196	1.98
35	158	158	70	39	15.49	0.04673	5.87	0.680	5.19



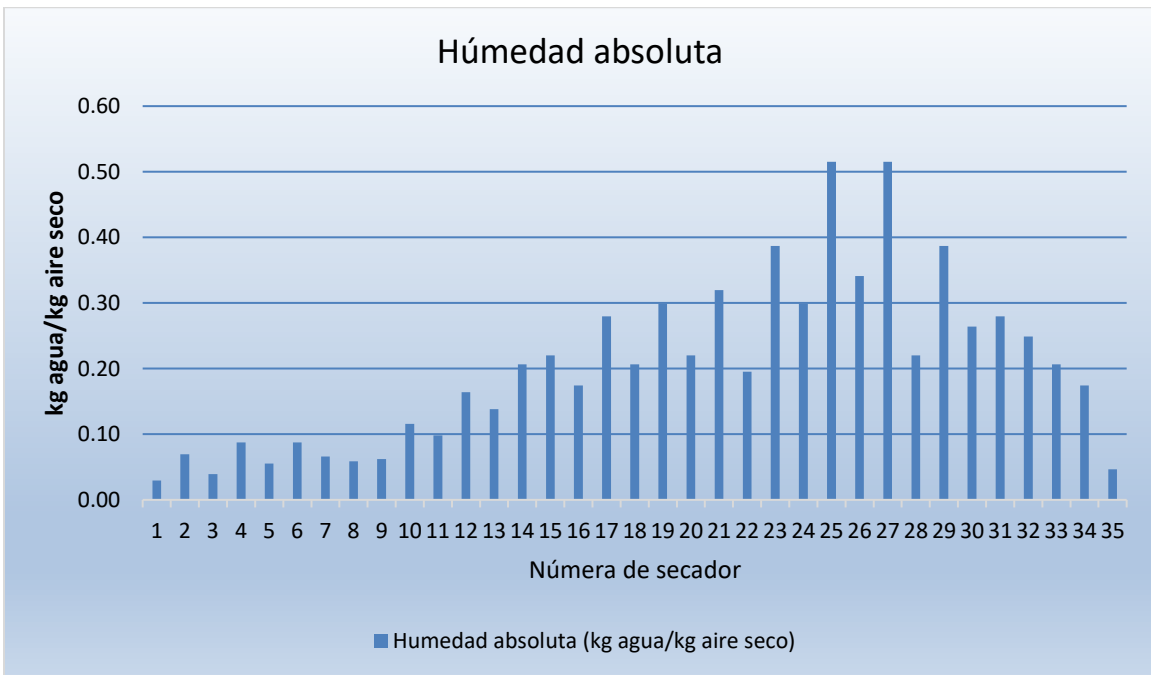
Gráfica 4. 7 Temperatura de la hoja y de los secadores en cada uno de estos para Fotobond 75 gr/m<sup>2</sup>.



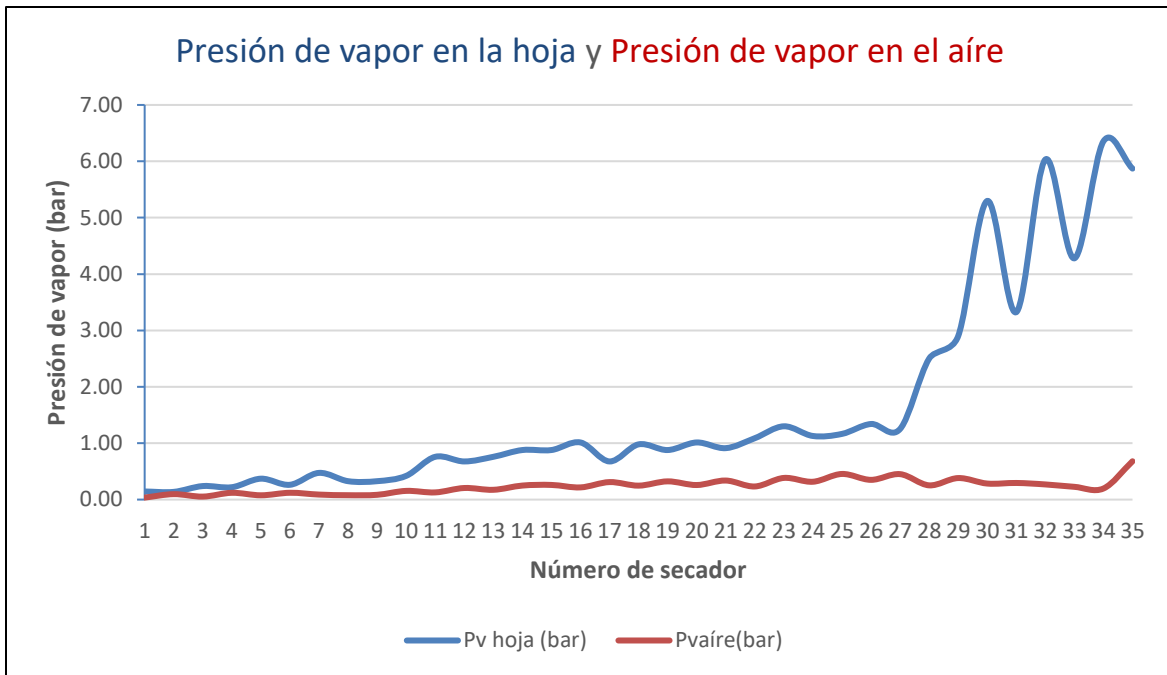
Gráfica 4. 8 Temperatura de bulbo seco y húmedo para Fotobond 75 gr/m<sup>2</sup>.



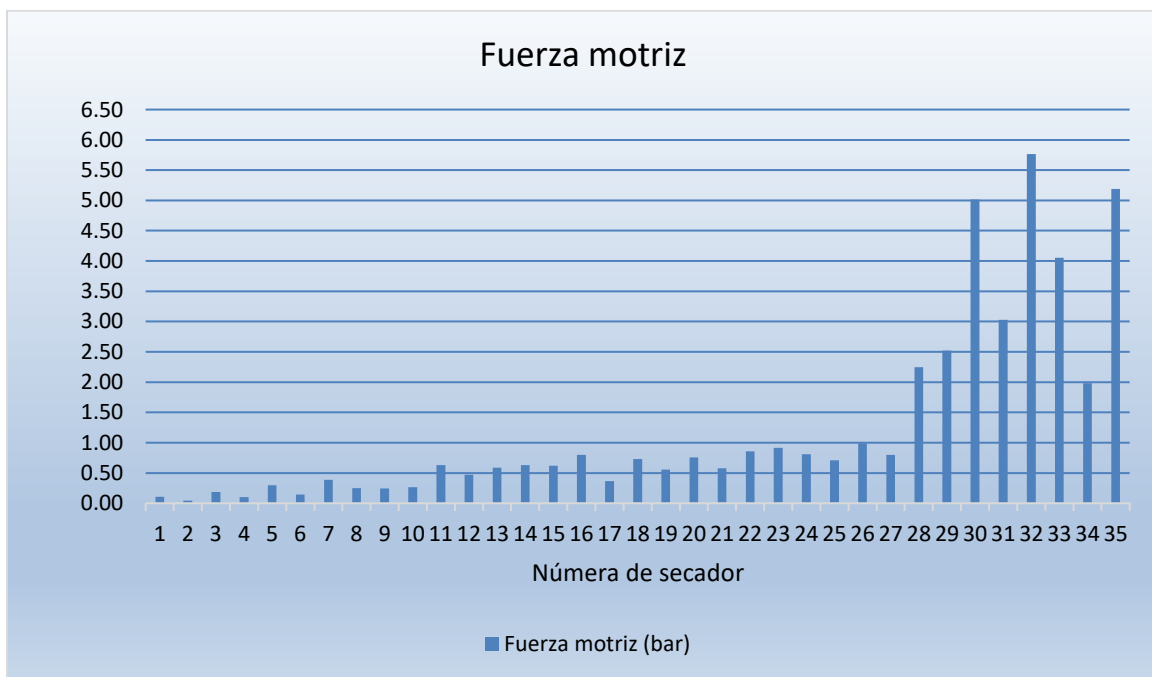
Gráfica 4. 9 Humedad relativa al interior de los “pockets” para Fotobond 75 gr/m<sup>2</sup>.



Gráfica 4. 10 Humedad absoluta al interior de los “pockets” para Fotobond 75 gr/m<sup>2</sup>.



Gráfica 4. 11 Presiones de vapor en la hoja y en el aire al interior de los “pockets” para Fotobond 75 gr/m<sup>2</sup>.



Gráfica 4. 12 Fuerza motriz en el secado del papel para Fotobond 75 gr/m<sup>2</sup>.



#### 4.3.1 Tasa de secado

Se realiza el cálculo de la tasa de secado para este tipo de papel y sus condiciones de operación. Sustituyendo los siguientes parámetros:

L= 96.2 % de abandono en seco

E= 42 % consistencia a la entrada del secador

S= 520 m/min

B= 75 g/m<sup>2</sup>

M= 1.290

N= 35 cilindros

A= 1 m<sup>2</sup> (valor tomado de la bibliografía [13])

D= 1.524 m

$$M = \frac{96,2}{42} - 1 = 1.290$$

$$R_W = 60 \frac{(520 \frac{m}{\min}) (75 \frac{g}{m^2}) (1.290)}{(35 \text{ cilindros}) (1 m^2) \pi (1.524 m)}$$

$$R_W = 18.019 \text{ kg de agua/h m}^2$$

#### 4.3.2 Cálculo de la humedad

Se procede a determinar la T (z), de la ecuación (3.10):

$$T(z) = \text{Exp} \left[ \frac{-z \sqrt{af_1 - k_m \tau''(x)}}{\sqrt{k_m \tau(x)}} \right] c_1,$$

donde

z ← calibre del papel, para este caso se tiene que:

$$z = 1.05 \times 10^{-4} \text{ m.}$$

donde:

$$\beta = - \frac{\rho_s - \rho_e}{\rho(T_s - T_e)},$$

donde  $\rho$  es la densidad del fluido, de tablas para el agua a 1 atm de presión externa y a 25 °C la  $\rho = 997.1 \text{ kg/m}^3$ , que sería la densidad estándar. La densidad a la entrada y salida del sistema es:

$$T_e = 53 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow \rho_e = 986.62 \text{ kg/m}^3,$$

$$T_s = 158 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow \rho_s = 902.72 \text{ kg/m}^3,$$

con lo cual

$$\beta = -\frac{(902.72 - 986.62)\text{kg/m}^3}{997.1 \text{ kg/m}^3(158 - 53)^\circ\text{C}}$$

$$\beta = 8.01 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}.$$

Por tanto,

$$a = 1 + \beta T_0$$

$$a = 1 + 8.01 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} (53^\circ\text{C})$$

$$a = 1.04$$

De la ecuación (3.4)

$$f_1(x) = u \rho_o C_p \tau'(x)$$

de donde

Velocidad de la máquina:  $u = 540 \text{ m/min}$

Densidad del agua a 53 °C:  $\rho_o = 986.62 \text{ kg/m}^3$

Calor específico:  $C_p = 500 \text{ J/kg }^\circ\text{C} = 1.824 \text{ J/kg }^\circ\text{K}$

De la interpolación del perfil de temperatura en el último secador  $\tau(x) = 158 \text{ }^\circ\text{C} = 431.15 \text{ }^\circ\text{K}$  se tiene que

$$\tau'(x) = -27.33 \text{ }^\circ\text{C} = 245.82 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$\tau''(x) = -64 \text{ }^\circ\text{C} = 209.15 \text{ }^\circ\text{K}$$

Por tanto

$$f_1 = (540 \text{ m/min})(986.62 \text{ kg/m}^3)(1.824 \text{ J/kg }^\circ\text{K})(245.82 \text{ }^\circ\text{K}) (1 \text{ min}/60 \text{ seg})$$

$$f_1 = 3.83 \times 10^6 \text{ J/m}^2 \text{ seg}$$

$$f_1 = 3.83 \times 10^6 \text{ W/m}^2$$

El coeficiente de conductividad térmica global:  $K_m = 2000 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{K}$

Sustituyendo datos en la ecuación (3.10) se tiene:

$$T(z) = \text{Exp} \left[ \frac{-1.05 \times 10^{-4} \sqrt{1.04(3.83 \times 10^6) - 2000(209.15)}}{\sqrt{2000(431.15)}} \right] c_1$$

$$T(z) = 0.99 c_1,$$

donde

$$c_1 = 158 \text{ } ^\circ\text{C},$$

por lo tanto

$$T(z) = 157.97 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

De la ecuación (3.2)

$$\rho_f = \rho_o [1 - \beta(T - T_o)],$$

sustituyendo datos

$$\rho_f = 986.62 \text{ kg/m}^3 [1 - 8.01 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} (157.97 \text{ } ^\circ\text{C} - 53 \text{ } ^\circ\text{C})]$$

$$\rho_f = 903.63 \text{ kg/m}^3$$

La permeabilidad específica para este gramaje:

$$K = 1.03 \times 10^{-13} \text{ m}^2$$

Por lo tanto sustituyendo datos en la ecuación (3.13)

$$w = \frac{2K\rho_f g}{\mu} = \frac{2(1.03 \times 10^{-13} \text{ m}^2)(903.63 \text{ kg/m}^3)(9.8 \frac{\text{m}}{\text{seg}^2})}{0.0003 \frac{\text{kg}}{\text{m seg}}}$$

$$w = 3.65 \times 10^{-4} \text{ m/seg}$$

Con lo cual la humedad (de la ec. 3.14) al final de la tercera etapa de secado será:

$$\mathcal{H} = \frac{w}{u} L = 1.02 \times 10^{-4} \text{ m}$$

Finalmente el porcentaje de humedad en este punto es:

$$\text{humedad} = \frac{z - \mathcal{H}}{z} * 100 = \frac{1.05 \times 10^{-4} \text{ m} - 1.02 \times 10^{-4} \text{ m}}{1.05 \times 10^{-4} \text{ m}} * 100$$

$$\text{humedad} = 2.47 \%$$

Esta humedad está dentro del rango del porcentaje requerido (2 a 3%) a la salida de la pre-sequería, el registrado por el escáner es de 2.3

Los resultados de este estudio de secado para el Fotobond 75 gr/m<sup>2</sup> indican que la humedad relativa en 22 de los 35 secadores estudiados, está por arriba del 50%, que es el valor máximo recomendado. La humedad absoluta en 14 de los 35 secadores se encuentra por arriba del parámetro recomendable. Lo anterior es un indicativo de una mala eficiencia en el aire inyectado y extraído de las secciones de secado.

El nivel de fuerza motriz para 25 de los 35 secadores se encuentra en el rango óptimo, superior a 0.54 bar. 5 secadores en el rango aceptable o bueno. Y los 5 restantes en el rango de fuerza motriz mala.

La tasa de secado para este caso fue de 18.019 kg de agua/h m<sup>2</sup>. Este parámetro no identifica por sí solo, los factores que afectan la velocidad de secado. Hay muchos factores que pueden afectar la tasa de secado, por ejemplo: tipo de prensado, permeabilidad de las lonas secadoras, ventilación en los bolsillos, superficie de los secadores y humedad de la campana.

4.3.3 Propuesta de un perfil de temperaturas en el secado del papel Fotobond 75 gr/m<sup>2</sup> y cálculo de su humedad.

Se propone un perfil de temperaturas para la etapa de pre-secado considerando el papel Fotobond 75 gr/m<sup>2</sup>. Se suponen los valores de temperatura de la hoja y de la superficie en cada secador y se consideran las condiciones de operación de la Máquina de papel de Biopapel Scribe planta Morelia. Los secadores 2, 4, 6 y 8 que se tienen sin suministro de vapor, pero que dadas las mediciones anteriores se puede notar que su temperatura no dista mucho de los valores registrados en los secadores que cuentan con suministro de vapor, ya que el sistema de secciones de secado se encuentra parcialmente aislado. También se supone un aumento gradual de la temperatura en cada secador (a partir del 9) de 2 °C y un  $\Delta T=10$  °C, entre la temperatura de la hoja y la temperatura de la superficie en cada secador. Se realizaron varios cálculos de la humedad, suponiendo perfiles de temperaturas y el que mejor se adapta y optimiza el proceso para la producción y secado del papel Fotobond 75 gr/m<sup>2</sup>, en la Máquina en cuestión es el siguiente:

*Tabla 4. 10 Perfil de temperaturas supuesto, de la hoja y superficie de los cilindros en la pre-sequería para Fotobond 75 gr/m<sup>2</sup>.*

<i>Secador</i>	<i>Temperatura de secador (°C)</i>	<i>Temperatura de la hoja (°C)</i>
1	65	55
2	57	50
3	68	60
4	60	57
5	72	64
6	60	57
7	76	68
8	67	60
9	78	70
10	80	70
11	82	72
12	84	74
13	86	76
14	88	78
15	90	80
16	92	82
17	94	84
18	96	86
19	98	88
20	100	90
21	102	92
22	104	94
23	106	96
24	108	98
25	110	100
26	112	102
27	114	104
28	116	106
29	118	108
30	120	110
31	122	112
32	124	114
33	126	116
34	128	118
35	130	120

Con este perfil de temperaturas se procede, a calcular la humedad de la hoja a la salida de la pre-sequería.

$$\beta = -\frac{\rho_s - \rho_e}{\rho(T_s - T_e)},$$

donde:

$$\rho = 997.1 \text{ kg/m}^3 \text{ (densidad estándar),}$$

La densidad a la entrada y salida del sistema es:

$$T_e = 55 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow \rho_e = 985.65 \text{ kg/m}^3,$$

$$T_s = 120 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow \rho_s = 939.2 \text{ kg/m}^3,$$

por tanto,

$$\beta = 7.16 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}.$$

con lo cual

$$a = 1 + \beta T_0$$

$$a = 1.04$$

De la ecuación (3.4)

$$f_1(x) = u \rho_o C_p \tau'(x)$$

de donde

$$\text{Velocidad de la máquina: } u = 560 \text{ m/min}$$

$$\text{Densidad del agua a } 55 \text{ }^\circ\text{C: } \rho_o = 985.65 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Calor específico: } C_p = 500 \text{ J/kg }^\circ\text{C} = 1.824 \text{ J/kg }^\circ\text{K}$$

$$\text{De la interpolación del perfil de temperatura en el último secador } \tau(x) = 120 \text{ }^\circ\text{C} =$$

393.15 °K se tiene que

$$\tau'(x) = -2 \text{ }^\circ\text{C} = 275.15 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$\tau''(x) = -0 \text{ }^\circ\text{C} = 273.15 \text{ }^\circ\text{K}$$

Por tanto

$$f_1 = 4.62 \times 10^6 \text{ J/m}^2 \text{ seg}$$

$$f_1 = 4.62 \times 10^6 \text{ W/m}^2$$

El coeficiente de conductividad térmica global:  $K_m = 2000 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{K}$

Sustituyendo datos en la ecuación (3.10) se tiene:

$$T(z) = 0.99 c_1,$$

donde

$$c_1 = 120 \text{ }^\circ\text{C},$$

por lo tanto

$$T(z) = 129.97 \text{ }^\circ\text{C}.$$

De la ecuación (3.2)

$$\rho_f = \rho_o[1 - \beta(T - T_o)],$$

sustituyendo datos

$$\rho_f = 932.69 \text{ kg/m}^3$$

La permeabilidad específica para este gramaje:

$$K = 1.03 \times 10^{-13} \text{ m}^2$$

Por lo tanto sustituyendo datos en la ecuación (3.13)

$$w = \frac{2K\rho_f g}{\mu}$$

$$w = 3.77 \times 10^{-4} \text{ m/seg}$$

Con lo cual la humedad (de la ec. 3.114) al final de la tercera etapa de secado será:

$$\mathcal{H} = \frac{w}{u} L = 9.81 \times 10^{-5} m$$

Finalmente el porcentaje de humedad en este punto es:

$$\text{humedad} = \frac{z - \mathcal{H}}{z} * 100$$

$$\text{humedad} = 2.33 \text{ } \%$$

Dicha humedad está dentro del rango del porcentaje requerido (2 a 3%) a la salida de la pre-sequería. Por tanto el perfil propuesto es adecuado.

## CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Del trabajo de investigación desarrollado en esta tesis, se derivan las siguientes conclusiones: Los resultados obtenidos del estudio de mediciones puntuales permiten concluir que las condiciones de operación de la máquina desde el punto de vista de secado de la hoja son aceptablemente eficientes, pero con áreas de oportunidad para reducir costos de operación.

Hay una alta humedad relativa en muchos “pockets”, por lo que se requiere una óptima inyección de aire caliente para solucionar esta situación e incrementar la capacidad de secado de la hoja.

Al comparar la temperatura de la hoja con la temperatura de los secadores, se puede notar que en algunos secadores, la diferencia entre estas temperaturas supera los 20 °C. Dos de las causas principales de este  $\Delta T$ , pueden ser: la alta humedad en los “pockets” y/o una baja tensión de las lonas por lo que se recomienda que se ajuste de tensión en estas últimas de 3 kg/cm.

La deficiente ventilación está propiciando que el aire en los “pockets” pierda capacidad para almacenar agua proveniente del secado de la hoja y por ello se manifiesta con una alta humedad relativa y absoluta.

La fuerza motriz resulta en el rango de aceptable para el papel Kromos Gráfico de 68 gr/m<sup>2</sup>. Y para el papel Fotobond de 75 gr/m<sup>2</sup>, en la mayoría de los secadores está en el rango óptimo. Sin embargo, debería ubicarse en todos los secadores en el rango de óptimo para cualquier gramaje que se fabrique.

Se recomienda aumentar la temperatura del aire que se introduce en los pockets, para asegurar fuerzas de evaporación altas, debido a la diferencia de presión entre el papel y el aire, evitando así la re humectación del mismo y favoreciendo el perfil de humedad. Además que reduce las pérdidas de calor desde la superficie del secador.

Una indicación precisa del contenido de humedad en la hoja de papel, es fundamental para el análisis de las secciones de secado. El objetivo de humedad en las etapas de secado



depende de los requisitos de uso final del papel fabricado. Pero en todos los casos se necesita uniformidad en el perfil del papel ya que si este perfil es irregular, puede dar lugar a problemas operacionales y de calidad del producto final. Muchas máquinas secan en exceso el papel, para compensar estas faltas de uniformidad en el perfil de humedad. Esta práctica da lugar a un mayor consumo de vapor. En el caso de los dos papeles estudiados en este trabajo, la humedad calculada para sus condiciones de operación y fabricación es la humedad esperada al final de esta etapa de secado.

Se supuso un perfil de temperaturas que podría optimizar el proceso de secado. se supone un incremento en la velocidad de la máquina de 40 m/min respecto a la velocidad con que se trabajó durante las mediciones mostradas para papel en el apartado 4.2.2, lo cual representa un aumento de la producción del 7.14%, es decir, 4922.89 ton/año, 4 430 600 dólares/año generados para los papeles de 75 gr/m<sup>2</sup>, muy significativo si además resaltamos que el perfil propuesto de temperaturas las supone inferiores a las medidas en el estudio de secado (como actualmente se trabajan) pero adecuadas para que el incremento en la temperatura de los cilindros secadores sea el óptimo para concluir con la humedad requerida al final de la pre-sequería. Lo cual representaría un ahorro energético en la generación de vapor y al mismo tiempo un ahorro significativo en el costo de producción.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. L. T. a. J. A. G. J. F. Colom, Monografias de materias papeleras. Introducción histórica a la fabricación de papel y pastas., Terrasa: Publicaciones de la UPC. Universidad Politécnica de Cataluna, 1984.
- [2] G. A. Smook, «Handbook for pulp and paper Technologists,» Vancouver, Angus Wilde Publications, 2002, p. 425 pp.
- [3] J. P. Casey, Pulp and Paper, Chemistry and Chemical Technology, 2da Ed. Vol. III.
- [4] W. K. Lewis, «The rate of drying of solid material,» Ind. Eng. Chem, 1921, pp. 427-432.
- [5] T. S. E.W. Coming, , The drying of solids. VII. Moisture movement by capillarity in drying granular materials, Ind. Eng. Chem., 1096-1098.
- [6] A. V. Luikov, Heat and mass transfer in capillary porous bodies, Pergamon Press Ltd., 1966.
- [7] R. B. Keey, «Migration of moisture in solids in Drying: Principles and practice,» Pergamon press, 1972, pp. Cap., 5. 121-148..
- [8] S. B. y. K. Luyben, Drying of food material: A review of recent development, Advances in Drying., Mujumdar, New York: A.S.Ed, Hemisphere Corp., 1980.
- [9] J. B. L. y. M. R. O. K. M. Waananen, «Drying tech, 11,» de *Classification of drying models for porous solids*, pp. 1-40.
- [10] «Steam Engineering tutorials,» Spirax Sarco, 2007. [En línea]. Available: <http://www.spiraxsarco.com/resources/steam-engineeringtutorials.asp>. [Último acceso: 12 Agosto 2007].
- [11] Y. A. Cengel, «Termodinámica,» México, 4ta ed. McGraw-Hill, 2003, p. 648 pp.
- [12] J. González y R. González, Tesis: Modelado y cálculo de la humedad en el secado de papel, Morelia, Michoacán; México.: Facultad de ciencias fisico-matematicas, 2015.
- [13] M. K. (ed), Paper making part 2, drying., Tappi Press, 2000.
- [14] K. J. O. Slatteke, Modeling of a steam heated rotating cylinder, Portland,OR,USA.: American Control Conference, 2005.

## APENDICE

### A. Tablas de presión de vapor Saturated Water and Steam

$T$ [°C]	$p_s$ [bar]	$v_g$ [m <sup>3</sup> /kg]	$h_f$ [kJ/kg]	$h_g$ [kJ/kg]	$s_f$ [kJ/kg K]	$s_g$ [kJ/kg K]	$s_g$ [kJ/kg K]	
0.01	0.006112	206.1	0*	2500.8	2500.8	0†	9.155	9.155
1	0.006566	192.6	4.2	2498.3	2502.5	0.015	9.113	9.128
2	0.007054	179.9	8.4	2495.9	2504.3	0.031	9.071	9.102
3	0.007575	168.2	12.6	2493.6	2506.2	0.046	9.030	9.076
4	0.008129	157.3	16.8	2491.3	2508.1	0.061	8.989	9.050
5	0.008719	147.1	21.0	2488.9	2509.9	0.076	8.948	9.024
6	0.009346	137.8	25.2	2486.6	2511.8	0.091	8.908	8.999
7	0.01001	129.1	29.4	2484.3	2513.7	0.106	8.868	8.974
8	0.01072	121.0	33.6	2481.9	2515.5	0.121	8.828	8.949
9	0.01147	113.4	37.8	2479.6	2517.4	0.136	8.788	8.924
10	0.01227	106.4	42.0	2477.2	2519.2	0.151	8.749	8.900
11	0.01312	99.90	46.2	2474.9	2521.1	0.166	8.710	8.876
12	0.01401	93.83	50.4	2472.5	2522.9	0.180	8.671	8.851
13	0.01497	88.17	54.6	2470.2	2524.8	0.195	8.633	8.828
14	0.01597	82.89	58.8	2467.8	2526.6	0.210	8.594	8.804
15	0.01704	77.97	62.9	2465.5	2528.4	0.224	8.556	8.780
16	0.01817	73.38	67.1	2463.1	2530.2	0.239	8.518	8.757
17	0.01936	69.09	71.3	2460.8	2532.1	0.253	8.481	8.734
18	0.02063	65.08	75.5	2458.4	2533.9	0.268	8.444	8.712
19	0.02196	61.34	79.7	2456.0	2535.7	0.282	8.407	8.689
20	0.02337	57.84	83.9	2453.7	2537.6	0.296	8.370	8.666
21	0.02486	54.56	88.0	2451.4	2539.4	0.310	8.334	8.644
22	0.02642	51.49	92.2	2449.0	2541.2	0.325	8.297	8.622
23	0.02808	48.62	96.4	2446.6	2543.0	0.339	8.261	8.600
24	0.02982	45.92	100.6	2444.2	2544.8	0.353	8.226	8.579
25	0.03166	43.40	104.8	2441.8	2546.6	0.367	8.190	8.557
26	0.03360	41.03	108.9	2439.5	2548.4	0.381	8.155	8.536
27	0.03564	38.81	113.1	2437.2	2550.3	0.395	8.120	8.515
28	0.03778	36.73	117.3	2434.8	2552.1	0.409	8.085	8.494
29	0.04004	34.77	121.5	2432.4	2553.9	0.423	8.050	8.473
30	0.04242	32.93	125.7	2430.0	2555.7	0.436	8.016	8.452
32	0.04754	29.57	134.0	2425.3	2559.3	0.464	7.948	8.412
34	0.05318	26.60	142.4	2420.5	2562.9	0.491	7.881	8.372
36	0.05940	23.97	150.7	2415.8	2566.5	0.518	7.814	8.332
38	0.06624	21.63	159.1	2411.0	2570.1	0.545	7.749	8.294
40	0.07375	19.55	167.5	2406.2	2573.7	0.572	7.684	8.256
42	0.08198	17.69	175.8	2401.4	2577.2	0.599	7.620	8.219
44	0.09100	16.03	184.2	2396.6	2580.8	0.625	7.557	8.182
46	0.1009	14.56	192.5	2391.8	2584.3	0.651	7.494	8.145
48	0.1116	13.23	200.9	2387.0	2587.9	0.678	7.433	8.111
50	0.1233	12.04	209.3	2382.1	2591.4	0.704	7.371	8.075
55	0.1574	9.578	230.2	2370.1	2600.3	0.768	7.223	7.991
60	0.1992	7.678	251.1	2357.9	2609.0	0.831	7.078	7.909
65	0.2501	6.201	272.0	2345.7	2617.7	0.893	6.937	7.830
70	0.3116	5.045	293.0	2333.3	2626.3	0.955	6.800	7.755
75	0.3855	4.133	313.9	2320.8	2634.7	1.015	6.666	7.681
80	0.4736	3.408	334.9	2308.3	2643.2	1.075	6.536	7.611
85	0.5780	2.828	355.9	2295.6	2651.5	1.134	6.410	7.544
90	0.7011	2.361	376.9	2282.8	2659.7	1.192	6.286	7.478
95	0.8453	1.982	398.0	2269.8	2667.8	1.250	6.166	7.416
100	1.01325	1.673	419.1	2256.7	2675.8	1.307	6.048	7.355

Saturated Water and Steam

$P$ [bar]	$T_s$ [°C]	$v_g$ [m <sup>3</sup> /kg]	$u_f$ $u_g$ [kJ/kg]	$h_f$ $h_{fg}$ $h_g$ [kJ/kg]	$s_f$ $s_{fg}$ $s_g$ [kJ/kg K]
0.006112	0.01	206.1	0† 2375	0* 2501 2501	0† 9.155 9.155
0.010	7.0	129.2	29 2385	29 2485 2514	0.106 8.868 8.974
0.015	13.0	87.98	55 2393	55 2470 2525	0.196 8.631 8.827
0.020	17.5	67.01	73 2399	73 2460 2533	0.261 8.462 8.723
0.025	21.1	54.26	88 2403	88 2451 2539	0.312 8.330 8.642
0.030	24.1	45.67	101 2408	101 2444 2545	0.354 8.222 8.576
0.035	26.7	39.48	112 2412	112 2438 2550	0.391 8.130 8.521
0.040	29.0	34.80	121 2415	121 2433 2554	0.422 8.051 8.473
0.045	31.0	31.14	130 2418	130 2428 2558	0.451 7.980 8.431
0.050	32.9	28.20	138 2420	138 2423 2561	0.476 7.918 8.394
0.055	34.6	25.77	145 2422	145 2419 2564	0.500 7.860 8.360
0.060	36.2	23.74	152 2425	152 2415 2567	0.521 7.808 8.329
0.065	37.7	22.02	158 2427	158 2412 2570	0.541 7.760 8.301
0.070	39.0	20.53	163 2428	163 2409 2572	0.559 7.715 8.274
0.075	40.3	19.24	169 2430	169 2405 2574	0.576 7.674 8.250
0.080	41.5	18.10	174 2432	174 2402 2576	0.593 7.634 8.227
0.085	42.7	17.10	179 2434	179 2400 2579	0.608 7.598 8.206
0.090	43.8	16.20	183 2435	183 2397 2580	0.622 7.564 8.186
0.095	44.8	15.40	188 2436	188 2394 2582	0.636 7.531 8.167
0.100	45.8	14.67	192 2437	192 2392 2584	0.649 7.500 8.149
0.12	49.4	12.36	207 2442	207 2383 2590	0.696 7.389 8.085
0.14	52.6	10.69	220 2446	220 2376 2596	0.737 7.294 8.031
0.16	55.3	9.432	232 2450	232 2369 2601	0.772 7.213 7.985
0.18	57.8	8.444	242 2453	242 2363 2605	0.804 7.140 7.944
0.20	60.1	7.648	251 2456	251 2358 2609	0.832 7.075 7.907
0.22	62.2	6.994	260 2459	260 2353 2613	0.858 7.016 7.874
0.24	64.1	6.445	268 2461	268 2348 2616	0.882 6.962 7.844
0.26	65.9	5.979	276 2464	276 2343 2619	0.904 6.913 7.817
0.28	67.5	5.578	283 2466	283 2339 2622	0.925 6.866 7.791
0.30	69.1	5.228	289 2468	289 2336 2625	0.944 6.823 7.767
0.32	70.6	4.921	295 2470	295 2332 2627	0.962 6.783 7.745
0.34	72.0	4.649	302 2472	302 2328 2630	0.980 6.745 7.725
0.36	73.4	4.407	307 2473	307 2325 2632	0.996 6.709 7.705
0.38	74.7	4.189	312 2475	312 2322 2634	1.011 6.675 7.686
0.40	75.9	3.992	318 2476	318 2318 2636	1.026 6.643 7.669
0.42	77.1	3.814	323 2478	323 2315 2638	1.040 6.612 7.652
0.44	78.2	3.651	327 2479	327 2313 2640	1.054 6.582 7.636
0.46	79.3	3.502	332 2481	332 2310 2642	1.067 6.554 7.621
0.48	80.3	3.366	336 2482	336 2308 2644	1.079 6.528 7.607
0.50	81.3	3.239	340 2483	340 2305 2645	1.091 6.502 7.593
0.55	83.7	2.964	351 2486	351 2298 2649	1.119 6.442 7.561
0.60	86.0	2.731	360 2489	360 2293 2653	1.145 6.386 7.531
0.65	88.0	2.535	369 2492	369 2288 2657	1.169 6.335 7.504
0.70	90.0	2.364	377 2494	377 2283 2660	1.192 6.286 7.478
0.75	91.8	2.217	384 2496	384 2278 2662	1.213 6.243 7.456
0.80	93.5	2.087	392 2498	392 2273 2665	1.233 6.201 7.434
0.85	95.2	1.972	399 2500	399 2269 2668	1.252 6.162 7.414
0.90	96.7	1.869	405 2502	405 2266 2671	1.270 6.124 7.394
0.95	98.2	1.777	411 2504	411 2262 2673	1.287 6.089 7.376
1.00	99.6	1.694	417 2506	417 2258 2675	1.303 6.056 7.359

Saturated Water and Steam

$p$ [bar]	$T_s$ [°C]	$v_g$ [m <sup>3</sup> /kg]	$u_f$ [kJ/kg]	$u_g$ [kJ/kg]	$h_f$ [kJ/kg]	$h_{fg}$ [kJ/kg]	$h_g$ [kJ/kg]	$s_f$ [kJ/kg K]	$s_{fg}$ [kJ/kg K]	$s_g$ [kJ/kg K]
1.0	99.6	1.694	417	2506	417	2258	2675	1.303	6.056	7.359
1.1	102.3	1.549	429	2510	429	2251	2680	1.333	5.994	7.327
1.2	104.8	1.428	439	2512	439	2244	2683	1.361	5.937	7.298
1.3	107.1	1.325	449	2515	449	2238	2687	1.387	5.884	7.271
1.4	109.3	1.236	458	2517	458	2232	2690	1.411	5.835	7.246
1.5	111.4	1.159	467	2519	467	2226	2693	1.434	5.789	7.223
1.6	113.3	1.091	475	2521	475	2221	2696	1.455	5.747	7.202
1.7	115.2	1.031	483	2524	483	2216	2699	1.475	5.707	7.182
1.8	116.9	0.9774	491	2526	491	2211	2702	1.494	5.669	7.163
1.9	118.6	0.9292	498	2528	498	2206	2704	1.513	5.632	7.145
2.0	120.2	0.8856	505	2530	505	2202	2707	1.530	5.597	7.127
2.1	121.8	0.8461	511	2531	511	2198	2709	1.547	5.564	7.111
2.2	123.3	0.8100	518	2533	518	2193	2711	1.563	5.533	7.096
2.3	124.7	0.7770	524	2534	524	2189	2713	1.578	5.503	7.081
2.4	126.1	0.7466	530	2536	530	2185	2715	1.593	5.474	7.067
2.5	127.4	0.7186	535	2537	535	2182	2717	1.607	5.446	7.053
2.6	128.7	0.6927	541	2539	541	2178	2719	1.621	5.419	7.040
2.7	130.0	0.6686	546	2540	546	2174	2720	1.634	5.393	7.027
2.8	131.2	0.6462	551	2541	551	2171	2722	1.647	5.368	7.015
2.9	132.4	0.6253	556	2543	556	2168	2724	1.660	5.344	7.004
3.0	133.5	0.6057	561	2544	561	2164	2725	1.672	5.321	6.993
3.5	138.9	0.5241	584	2549	584	2148	2732	1.727	5.214	6.941
4.0	143.6	0.4623	605	2554	605	2134	2739	1.776	5.121	6.897
4.5	147.9	0.4139	623	2558	623	2121	2744	1.820	5.037	6.857
5.0	151.8	0.3748	639	2562	640	2109	2749	1.860	4.962	6.822
5.5	155.5	0.3427	655	2565	656	2097	2753	1.897	4.893	6.790
6	158.8	0.3156	669	2568	670	2087	2757	1.931	4.830	6.761
7	165.0	0.2728	696	2573	697	2067	2764	1.992	4.717	6.709
8	170.4	0.2403	720	2577	721	2048	2769	2.046	4.617	6.663
9	175.4	0.2149	742	2581	743	2031	2774	2.094	4.529	6.623
10	179.9	0.1944	762	2584	763	2015	2778	2.138	4.448	6.586
11	184.1	0.1774	780	2586	781	2000	2781	2.179	4.375	6.554
12	188.0	0.1632	797	2588	798	1986	2784	2.216	4.307	6.523
13	191.6	0.1512	813	2590	815	1972	2787	2.251	4.244	6.495
14	195.0	0.1408	828	2593	830	1960	2790	2.284	4.185	6.469
15	198.3	0.1317	843	2595	845	1947	2792	2.315	4.130	6.445
16	201.4	0.1237	857	2596	859	1935	2794	2.344	4.078	6.422
17	204.3	0.1167	870	2597	872	1923	2795	2.372	4.028	6.400
18	207.1	0.1104	883	2598	885	1912	2797	2.398	3.981	6.379
19	209.8	0.1047	895	2599	897	1901	2798	2.423	3.936	6.359
20	212.4	0.09957	907	2600	909	1890	2799	2.447	3.893	6.340
22	217.2	0.09069	928	2601	931	1870	2801	2.492	3.813	6.305
24	221.8	0.08323	949	2602	952	1850	2802	2.534	3.738	6.272
26	226.0	0.07689	969	2603	972	1831	2803	2.574	3.668	6.242
28	230.0	0.07142	988	2603	991	1812	2803	2.611	3.602	6.213
30	233.8	0.06665	1004	2603	1008	1795	2803	2.645	3.541	6.186
32	237.4	0.06246	1021	2603	1025	1778	2803	2.679	3.482	6.161
34	240.9	0.05875	1038	2603	1042	1761	2803	2.710	3.426	6.136
36	244.2	0.05544	1054	2602	1058	1744	2802	2.740	3.373	6.113
38	247.3	0.05246	1068	2602	1073	1729	2802	2.769	3.322	6.091
40	250.3	0.04977	1082	2602	1087	1714	2801	2.797	3.273	6.070

B. Tablas de la densidad del agua a diferentes temperaturas.

Presión externa: 1 atm = 101 325 Pa

Temperatura °C	Densidad kg / m <sup>3</sup>	Temperatura °C	Densidad kg / m <sup>3</sup>	Temperatura °C	Densidad kg / m <sup>3</sup>
0 (hielo)	917,00	33	994,76	67	979,34
0	999,82	34	994,43	68	978,78
1	999,89	35	994,08	69	978,21
2	999,94	36	993,73	70	977,63
3	999,98	37	993,37	71	977,05
4	1000,00	38	993,00	72	976,47
5	1000,00	39	992,63	73	975,88
6	999,99	40	992,25	74	975,28
7	999,96	41	991,86	75	974,68
8	999,91	42	991,46	76	974,08
9	999,85	43	991,05	77	973,46
10	999,77	44	990,64	78	972,85
11	999,68	45	990,22	79	972,23
12	999,58	46	989,80	80	971,60
13	999,46	47	989,36	81	970,97
14	999,33	48	988,92	82	970,33
15	999,19	49	988,47	83	969,69
16	999,03	50	988,02	84	969,04
17	998,86	51	987,56	85	968,39
18	998,68	52	987,09	86	967,73
19	998,49	53	986,62	87	967,07
20	998,29	54	986,14	88	966,41
21	998,08	55	985,65	89	965,74
22	997,86	56	985,16	90	965,06
23	997,62	57	984,66	91	964,38
24	997,38	58	984,16	92	963,70
25	997,13	59	983,64	93	963,01
26	996,86	60	983,13	94	962,31
27	996,59	61	982,60	95	961,62
28	996,31	62	982,07	96	960,91
29	996,02	63	981,54	97	960,20
30	995,71	64	981,00	98	959,49
31	995,41	65	980,45	99	958,78
32	995,09	66	979,90	100	958,05

Temperatura		Densidad
$T$		$\rho$
K	°C	(kg/m <sup>3</sup> )
273	0	999,3
293	20	998,2
313	40	992,2
333	60	983,2
353	80	-
373	100	958,4
473	200	862,4
575	300	712,5

### C. Psicrómetro

Características:

- Carcasa ergonómica.
- Manejo con una sola mano.
- Iluminación de fondo.
- Indicación de valores extremos y HOLD.
- Desconexión automática desactivable.
- Medición del punto de rocío y la temperatura de bulbo húmedo.

*Tabla 1. Especificaciones técnicas de psicrómetro*

<b>Rango de medición de humedad relativa</b>	0 ... 20 % (precisión: ±4 % H.r.)
	20 ... 40 % (precisión: ±3 % H.r.)
	40 ... 60 % (precisión: ±2 % H.r.)
	60 ... 80 % (precisión: ±3 % H.r.)
	80 ... 100 % (precisión: ±4 % H.r.)

<b>Rango de medición de temperatura</b>	-30 ... -19,9 °C (precisión: ±1,0 °C) -20 ... +60 °C (precisión: ±0,5 °C) +60 ... +100 °C (precisión: ±1,0 °C)
<b>Resolución</b>	0,1 % H.r. 0,1 °C
<b>Unidades</b>	°C °F Punto de rocío (°C / °F) Temperatura de bulbo húmedo (°C / °F)
<b>Parámetros de medición</b>	% H.r., GPP (Grains per pound), g/kg, g/m <sup>3</sup> (absoluto), gr/ft <sup>3</sup> (absoluto)
<b>Pantalla</b>	LCD dual
<b>Tiempo de respuesta</b>	Aprox. < 15 segundos
<b>Tipo de sensor</b>	Humedad relativa: Sensor capacitivo preciso Temperatura: Termistor
<b>Humedad absoluta</b>	0 ... 500 g/m <sup>3</sup> 0 ... 218,5 g/ft <sup>3</sup>
<b>Rango Temperatura del punto de rocío</b>	-30 ... +100 °C
<b>Rango Temperatura de bulbo húmedo</b>	0 ... +80 °C
<b>Condiciones de funcionamiento</b>	0 ... +50 °C, <80 % H.r. (sin condensación)
<b>Condiciones de almacenamiento</b>	-40 ... +85 °C, <99 % H.r. (sin condensación)
<b>Alimentación</b>	1 x pila de 9 V
<b>Vida operativa de la pila</b>	Aprox. 48 horas
<b>Dimensiones</b>	300 x 75 x 50 mm
<b>Peso</b>	a.



Figura 1. Psicrómetro PCE-HVAC 3



#### D. Pirómetro

##### Características.

- Rango de mediciones:  $-18\text{ °C} \sim 550\text{ °C}$ .
- Memoria volátil.
- Interruptor de láser.
- Función de búsqueda.
- Función de retención de datos "Data Hold".
- Posibilidad de medir en grados  $\text{°C}$  y  $\text{°F}$ .
- Medición de mínimo/máximo.
- Función de cálculo de temperatura promedio y diferencia de temperaturas.
- Zócalo para instalar sobre una trípode.
- Modo de espera.
- Indicador de batería baja.

*Tabla 2. Datos técnicos de pirómetro UNI-T UT301C.*

<b>Pantalla</b>	<b>LCD con iluminación, 32 x 29 mm</b>	
<b>Temperatura</b>	Rango	$-18\text{° a } 550\text{°C}$
	Error de medida	$\pm 1.8\text{°C } (\pm 2\%)$
	Resolución	0.1
<b>Repetitividad de resultados</b>	$\pm 0.5\text{ °C } (\pm 0.5\%)$	
<b>Resolución óptica</b>	12:1	
<b>Láser</b>	Longitud de onda 630-670 nm	
<b>Alimentación</b>	Pila de 9 V (6F22)	
<b>Dimensiones</b>	169 x 138 x 53 mm	
<b>Peso</b>	270 g	



*Figura 2. Pirómetro infrarrojo*