



Universidad del Bío-Bío
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería en Maderas
Escuela Ingeniería Civil Química



“ANÁLISIS DE CONDENSACIÓN DE VAPOR DE AGUA EN SILOS Y DUCTOS DE MANEJO DE FIBRA DE MADERA EN LA PRODUCCIÓN DE TABLEROS DE MEDIANA DENSIDAD”

Informe de Habilitación Profesional presentado en conformidad a los requisitos para
obtener el título de Ingeniera Civil Química

IMARA ALARCÓN OSSES

Profesor tutor: Dr. Aldo Ballerini A.
Ingeniero Supervisor: Nilton Rivas A.

Concepción, 1 de Agosto 2019

RESUMEN

El presente trabajo se desarrolló en la empresa Masisa S.A., ubicada en Cabrero, la cual produce tableros a base de madera, y contempla dos líneas productivas, entre ellas: tableros de partículas y tableros de fibra de densidad media. Los productos que se obtienen de la línea de tableros de densidad media son: ultra liviano, liviano, y delgados, los cuales se diferencian por su espesor y densidad.

Los tableros delgados, se caracterizan por que poseen menor espesor de 2,5 a 6 mm, y una mayor densidad en rangos de 700 a 850 kg/m³. Durante el invierno la producción de tableros delgados suele tener una mayor complejidad, esto se debe a las condiciones climáticas que predominan durante los meses más fríos, lo que se traduce en temperaturas ambientales entre 0,7 a 7 °C y humedades relativas altas entre 90 a 95%, estas condiciones influyen de manera directa en el proceso, debido a la utilización de transporte neumático para conducir la fibra, a través de los silos y ductos del proceso, favoreciendo así el fenómeno de condensación de vapor de agua.

El objetivo de este estudio es analizar las variables involucradas en el fenómeno de condensación de vapor de agua en los silos y ductos del área manejo de fibra en la producción de tableros de mediana densidad, para esto se realizaron mediciones de temperatura interna, además se estimaron sus respectivas temperaturas superficiales y de punto de rocío. Mediante el análisis de estas variables, se determinó que las áreas del proceso en donde es más susceptible la condensación, son: el separador de grumos, la entrada del ciclón de formación, y el silo de fibra.

Para prescindir de la condensación de vapor de agua en estos puntos, se analizaron dos soluciones: la primera considera recubrir el silo de fibra mediante un material aislante térmico, y la segunda contempla la utilización de un intercambiador de calor.

Al evaluar los distintos tipos de recubrimientos: manta elastomérica, poliestireno y poliuretano expandido en diferentes espesores 40 y 80 mm, se encontró que

independiente del tipo de material y de su espesor, la condensación seguirá prevaleciendo.

El origen de la problemática planteada se encuentra en la condición de saturación al interior de los silos y ductos, influenciada por la utilización del aire como transporte neumático. Por esta razón, un incremento de la temperatura al interior, disminuirá la humedad relativa del entorno, y por consecuencia, este se alejará de la condición de saturación.

Para lograr el incremento de temperatura requerido se propuso como solución habilitar un intercambiador de calor empleando aceite térmico a 260 °C considerando un flujo de 0,39 m³/h, la utilización de este intercambiador no tendría un costo de instalación asociado para la empresa.

AGRADECIMIENTOS

Mis más sinceros agradecimientos a la empresa Masisa S.A., por brindarme la oportunidad para desarrollar este trabajo, a mi supervisor Sr. Nilton Rivas por desafiarme a desenvolverme de manera autónoma como futura profesional, y a mi profesor guía Dr. Aldo Ballerini, quien me apoyo constantemente en cumplir esta etapa.

A la escuela de Ingeniería Civil Química de la Universidad del Bío-Bío por la formación académica que me han entregado durante estos años.

A mis amados padres, Cristina y Alexis, quienes me han apoyado durante mi formación educacional, por entregarme las herramientas y valores para ser una mejor persona. A toda mi familia en general, por su constante preocupación y apoyo.

A mis amigos y amigas que me brindo la Universidad: María Paz Soto, Constanza Moreno, Camila Aránguiz, Camila Correa, Josseline Sepúlveda, Cesia Garcés, Claudio Navarrete, Sebastián Zambrano, Milton Vergara y Gustavo Astudillo, siempre fue grato compartir alegrías, tristezas, horas de estudio, estrés y relaxo, espero que nuestros lazos se mantengan por siempre. A mi amiga Pamela Inzunza, porque a pesar de la distancia, nuestra amistad permanece intacta.

También mis agradecimientos a las Ingenieras de Proceso, Srta. Carolina Soto y Srta. Angélica Gallegos, quienes me guiaron durante la estadía en la empresa. Al Sr. Sergio Baeza, por su agradable intención de querer ayudarme hasta en las cosas más básicas. A los operadores de la línea MDF, a mis amigos de la bodega de materiales y a la Sra. Claudia B., quienes desde el primer día me acogieron y me apoyaron.

Simplemente, gracias.

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN	ii
AGRADECIMIENTOS	iv
TABLA DE CONTENIDOS	v
NOMENCLATURA	vii
1. INTRODUCCIÓN	9
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	13
3.1 Definición MDF	13
3.2 Descripción del proceso de fabricación de tableros MDF	13
3.3 Variables importantes en el proceso de fabricación MDF	16
3.4 Condensación de vapor de agua	20
3.4.1 Carta psicrométrica.....	21
3.4.2 Condiciones ambientales.....	23
3.5 Concepto de transferencia de calor	24
4. OBJETIVOS	27
4.1 Objetivo general	27
4.2 Objetivos específicos	27
5. METODOLOGÍA	28
5.1 Recursos, materiales y equipamiento	28
5.2 Procedimiento	29
5.2.1 Apreciación del personal de la línea MDF frente a la problemática.	29
5.2.2 Registro, y obtención de datos.....	30
5.2.3 Desarrollo de balance de materia y energía	31

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	33
6.1 Recopilación de información, mediante la encuesta realizada por <i>Survio</i>	33
6.2 Análisis de registro de datos	36
6.2.1 Condiciones ambientales.....	36
6.2.2 Comportamiento de la temperatura interna de los ductos	37
6.2.3 Condensación de vapor de agua en ductos del proceso	38
6.2.4 Condensación de vapor de agua en el silo de fibra	40
6.3 Análisis de soluciones frente a la problemática	41
6.3.1 Aislamiento térmico.....	41
6.3.2 Habilitación del intercambiador de calor	45
6.3.2.1 Balance de masa y energía para el funcionamiento del intercambiador de calor.....	45
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	47
7.1. Conclusiones	47
7.2 Recomendaciones	48
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49
ANEXOS.....	53
Anexo 1.....	53
Anexo 2.....	54
Anexo 3.....	55
Anexo 4.....	58

NOMENCLATURA

Símbolo	Definición	Unidad
T	Temperatura	°C
Δt	Diferencia de temperatura	°C
t.s.	Temperatura superficial	°C
HR	Humedad relativa	%
PR	Temperatura punto de rocío	°C
W	Contenido de humedad	g/kg de aire seco

Subíndices

amb.	Referido al aire ambiente
$T_{b.h}$	Bulbo húmedo con respecto a la temperatura
$T_{b.s.}$	Bulbo seco con respecto a la temperatura
C.S.	Referido a la cinta de secado
Z.S.	Referido al separado de grumos
C.F.	Referido al ducto de entrada del ciclón de formación
S.F.	Referido al silo de fibra
Cond.	Conducción
Conv.	Convección
Rad.	Radiación

Lista de figuras

Figura 1. Esquema del proceso de elaboración de tableros MDF.....	13
Figura 2. Diagrama de fases del agua	21
Figura 3. Red de resistencias térmicas en una pared plana	26
Figura 4. Tablero delgado manchado por condensación de vapor de agua.....	29
Figura 5. Diagrama de mediciones en el área de secado/ silo de fibra	30
Figura 6. Diagrama intercambiador de calor	31
Figura 7. Apreciación de la causa de los tableros MDF manchados.....	33
Figura 8. Percepción de la zona de generación de gotas según operadores MDF	34
Figura 9. Frecuencia de manchas según el tipo de tablero fabricado	35
Figura 10. Efecto de la temperatura ambiente y la humedad relativa según media horaria.....	36
Figura 11. Seguimiento de temperatura interna del proceso, según media horaria	37
Figura 12. Efecto de la temperatura superficial, la temperatura de bulbo seco, y el punto de rocío en el silo de fibra, según media horaria.....	41
Figura 13. Pared compuesta del silo de fibra, situación actual	43
Figura 14. Pared compuesta con alternativa de aislamiento térmico propuesto	44
Figura 15. Circuito de control automático de un intercambiador de calor.....	46

Lista de tablas

Tabla 1. Tipos de transferencia de calor.....	24
Tabla 2. Conducción y radiación en términos de la resistencia térmica	25
Tabla 3. Dispositivos y materiales para el registro de datos.....	28
Tabla 4. Costo unitario estimativo equivalente a la producción MDF	35
Tabla 5. Propiedades del aire de temperatura de bulbo seco	38
Tabla 6. Análisis de condensación en ductos, a temperatura de bulbo seco mínima....	39
Tabla 7. Análisis de condensación en ductos, a temperatura de bulbo seco máxima...	40
Tabla 8. Materiales empleados para aislación térmica del silo de fibra	42
Tabla 9. Resumen de propiedades de transferencia de calor en el silo de fibra	43
Tabla 10. Análisis de materiales para recubrimiento del silo de fibra	44

1. INTRODUCCIÓN

Un tablero a base de madera es un producto que se forma a partir de partículas, astillas, laminas o fibras de esta y que se mezcla con algún tipo de material adhesivo con el objetivo de rediseñar un producto, permitiendo el manejo de las propiedades físico-mecánicas de los tableros.

En lo que se refiere a la producción a nivel mundial se encuentran los Tableros Contrachapados, Tableros de Partículas, Tableros de Fibra de Densidad Media o MDF (Medium Density Fiberboard), y Tableros OSB (Oriented Strand Board).

Los tableros MDF son paneles producidos a partir de fibras lignocelulósicas mediante la aplicación de calor y presión. La unión entre las fibras está dada por las propiedades adhesivas inherentes a las fibras en el proceso en seco, y a su vez por la adhesión de resinas sintéticas (González, 1993).

Masisa S.A es una empresa que se dedica entre otros materiales derivados de la madera a la elaboración de tableros de densidad media, y tableros de partículas, cuyos espesores nominales varían desde 2,5 mm hasta 38 mm. La siguiente investigación se refiere al fenómeno de condensación de vapor de agua en algunos puntos específicos del proceso productivo de MDF.

Dentro de lo que significa el proceso productivo de la planta, existe una complejidad durante el invierno, estación del año que se caracteriza por temperaturas más bajas y un índice de humedad relativa mayor, esta complejidad radica en el aumento de tableros de rechazo debido a la formación de manchas por gotas de agua producto de la condensación de vapor de agua en la línea productiva, esta situación es acentuada en la producción de tableros delgados y de menor magnitud en otros tableros de la serie de productos, esto se debe principalmente a que en los tableros delgados la fibra se procesa con un contenido de humedad mayor. Con la finalidad de minimizar esta dificultad, se ha recubierto con aislación ciertas zonas de la línea de producción con una manta

elastomérica y/o se han pintado las zonas con pinturas aislantes, estas medidas si bien han contribuido a disminuir la formación de manchas no las ha erradicado en su totalidad.

Por tanto, es de interés realizar un estudio en la línea de producción, el cual abarque desde el área de manejo de fibra específicamente desde la “Cinta de descarga del secador” hasta el “Silo de fibra de formación de manto”.

La organización del estudio fue realizada de la siguiente manera:

- a) Revisión de antecedentes disponibles con relación a la problemática expuesta, especificación de equipos y bibliografía relacionada.
- b) Identificación de puntos de mediciones de temperatura-humedad relativa, además de la búsqueda de instrumentos para realizar la toma de datos adicionales para complementar la investigación.
- c) Análisis de variables implicadas en el fenómeno de condensación de vapor de agua.
- d) Conclusiones y recomendaciones sugeridas para solucionar el problema de condensación de vapor de agua.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La planta Masisa S.A complejo Cabrero, se encuentra ubicada en la VIII región del Bío Bío. El siguiente estudio se centró en el análisis a la línea de producción de tableros de densidad media, MDF, los productos que se obtienen de esta línea productiva son ultraliviano, liviano, y delgado, esta clasificación se realiza en base a su espesor y densidad. Se considera un tablero ultraliviano cuando su espesor varía entre 14 a 30 mm y su densidad media es de 520 kg/m^3 , un tablero de tipo liviano posee un rango de espesor entre 9 a 30 mm y una densidad media de 620 kg/m^3 , el rango de espesor en un tablero delgado es de 2,5 a 6 mm, siendo su densidad en torno a 730 a 850 kg/m^3 (Masisa S.A, 2015). Actualmente, la producción media es de $30.000 \text{ m}^3/\text{mes}$ donde gran parte de esta producción se basa en tableros ultralivianos de espesor de 14, 15, 17 y 18 mm.

Los tableros delgados se caracterizan por ser tableros que poseen una densidad mayor dentro de la gama de productos. Sin embargo, producir estos tableros suele tener una mayor complejidad durante los meses invernales, en los cuales se percibe la notoria disminución de temperatura producto de la estación del año que acontece, invierno, las temperaturas mínimas entre estos meses en la zona de Cabrero se encuentran en el rango de 4 a $6 \text{ }^\circ\text{C}$, mientras que las temperaturas máximas fluctúan entre 13 a $16 \text{ }^\circ\text{C}$ (Spark, 2017), esta disminución de temperatura en conjunto con el aumento de humedad relativa conlleva a un inconveniente a la hora de elaborar tableros de este tipo, dado que prevalece el fenómeno de condensación de vapor de agua en la línea de proceso MDF, específicamente en el área que abarca entre la descarga del secador y el silo de fibra, este último siendo más notorio debido a que la formación de las gotas por condensación de vapor de agua afecta directamente el manto de formación del tablero, provocando manchas en la superficie del producto final. Los tableros manchados pueden comprometer una gran cantidad de volumen en un orden de producción específica, aumentando los costos de producción y pérdida de oportunidades de venta, debido al aumento de volumen de rechazos.

Las gotas que afectan a las fibras no solo originan manchas en los tableros, sino también pueden producir corrosión tanto en equipos como en tuberías dispuestos en la línea de producción, reduciendo considerablemente su vida útil. Lo anterior, se produce debido a la corrosión atmosférica existente en el sistema, de tipo húmedo-mojado, la corrosión en los equipos no solo se ve afectada por las condiciones bajo las cuales se lleva a cabo el proceso, sino también influyen factores como las condiciones de exposición, la composición del metal, entre otros (Bilurbina Alter, Liesa Mestres, & Iribarren, 2003).

Actualmente, para prevenir la condensación no se tiene un control adecuado de los parámetros que influyen en este fenómeno, la mayor consecuencia conlleva al aumento de rechazos, y a la detención del proceso en el momento que se visualizan tableros manchados a la salida de la prensa, frente a la detención, la medida transitoria que se emplea es limpiar uno de los puntos donde habitualmente existe la presencia de gotas, es decir, en el silo de fibra. Sobre los efectos de corrosión no existe ninguna medida contemplada, los equipos sufren un desgaste, que se evidencia en el color marrón proveniente de la oxidación del material ferroso.

El siguiente estudio tiene como finalidad realizar recomendaciones para prescindir de la condensación de vapor de agua, disminuyendo así la cantidad de tableros de rechazados.

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1 Definición MDF

Los tableros de fibra de densidad media se definen como elementos fabricados con filamentos de madera, obtenidos por procesos químicos, mecánicos o combinados, en conjunto con otros materiales lignocelulósicos fibrosos. Las características que destacan en este tipo de tableros son: color uniforme, tamaño de fibra homogéneo en toda su superficie, equilibrado perfil de densidad, material adecuado para acabados como barnizado, pinturas, revestimiento, entre otros, mejores parámetros físicos de resistencia, buena estabilidad dimensional y gran capacidad de mecanizado (Keil & Spavento, 2009). El MDF se produjo por primera vez a fines de la década de 1960 con la clara intención de competir con los tableros compuestos por partículas (Lin, Bhattacharyya, & Van Houts, 2006).

3.2 Descripción del proceso de fabricación de tableros MDF

El proceso de elaboración de los tableros MDF en Masisa S.A. contempla distintas etapas, en la Figura 1 se visualiza un diagrama general del proceso productivo.

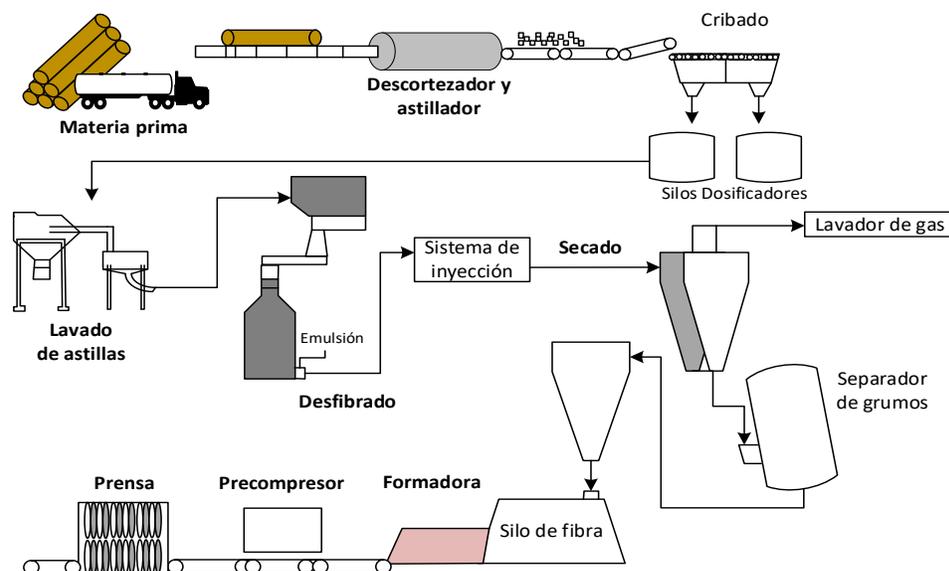


Figura 1. Esquema del proceso de tableros MDF (Fuente: Elaboración propia).

En la primera etapa del proceso se encuentra la estación de recepción de astillas, donde se almacena la materia prima. A su vez, existen camiones que proveen rollizos de *Pinus radiata*, los cuales se disponen en la cancha de acopio para luego ser trasladados al descortezador; los rollizos ya descortezados son llevados a un astillador que transforma los rollizos en astillas, mientras que la corteza removida de los rollizos es dispuesta en la pila de biomasa para ser incinerada en la planta térmica con la finalidad de generar energía térmica demandada por el proceso.

Las astillas son llevadas a una etapa de cribado que permite seleccionar aquellas astillas con un tamaño aceptado, de aquellas que poseen sobre tamaño y de los finos.

Luego, las astillas son transportadas a una etapa de lavado donde la función es extraer materiales ajenos a la madera que interfieren en la calidad del producto, como por ejemplo: arena, piedrecillas, restos de corteza, metales, entre otros. En seguida, procede la etapa de vaporizado, donde el objetivo es homogeneizar la temperatura y el contenido de humedad de las astillas.

Posteriormente, las astillas pasan por un proceso de tratamiento térmico con vapor de agua saturado en un digestor, donde el propósito es plastificar las uniones de lignina, permitiendo la separación de las células de la madera en la etapa de desfibrado termomecánico.

La emulsión se añade justo antes de la etapa de desfibrado, esto con el propósito de mejorar el comportamiento de las fibras frente a la humedad (García, 2002). El desfibrado consiste de manera sencilla, en la transformación de las astillas a fibras de madera, inmediatamente después y mediante un sistema de inyección de adhesivos, se incorpora resina de tipo urea-formaldehído, secuestrante de formaldehído y agua, la proporción de estos aditivos está delimitada según prescripción estipulada para cada producto.

Posteriormente, la fibra ingresa al secador donde se busca ajustar la humedad requerida según cada tipo de producto. El secado de la fibra se realiza por el principio de “Flash tube”, el cual implica el secado de la fibra mediante transporte neumático de una etapa, es decir, al mismo tiempo que la fibra se seca se desplaza a través de los ductos por medio de una mezcla de gases calientes provenientes de la planta térmica en adición de aire fresco. En esta condición, la evaporación del agua se produce cuando la fibra húmeda entra en contacto directo con el aire caliente de secado, resultando una alta tasa de evaporación en la superficie de la fibra, así la temperatura del aire de secado va disminuyendo a medida que el agua se va evaporando (Pang, 2000).

La fibra es trasladada hacia dos ciclones, mediante transporte neumático, en donde la principal función en este punto es separar el vapor de agua contenido en la fibra, lo que conlleva a una estabilización de la humedad de esta, parámetro que es medible y controlable en la cinta transportadora según el tipo de producto solicitado.

A través de un sistema de limpieza neumático los grumos son separados de la fibra mediante un equipo especial, denominado Z-Sifter. La fibra es descargada en el ciclón de formación en donde la mezcla vapor de agua, aire y fibra es separada, siendo el aire recirculado al sistema de separación de grumos mientras que la fibra cae al interior del silo de fibra, un depósito donde se almacena la fibra seca momentáneamente. A la descarga del silo de fibra se forma el manto en una formadora mecánica, la cual por medio de una cama de rodillos esparce la fibra sobre una cinta continua y a velocidad uniforme.

En la etapa de prensado se busca consolidar el manto aplicando presión y temperatura durante un periodo de tiempo especificado por producto, con estas variables se produce la polimerización del adhesivo incorporado en las fibras, consiguiendo así las características físico-mecánicas para cada producto.

A la salida de la prensa se le da la dimensión adecuada según el formato a comercializar. Además, en este punto se realiza la toma de muestras por el área de

control técnico, para determinar las propiedades físico-mecánicas, controles operacionales de espesor y peso de cada tablero.

En la etapa final del proceso, cada tablero es trasladado a un sistema de ruedas enfriadoras para disminuir la temperatura de los tableros de manera natural y detener la reacción de polimerización por temperatura, luego son almacenados por un tiempo determinado para concluir con el proceso de estabilización a temperatura ambiente.

3.3 Variables importantes en el proceso de fabricación MDF

En el transcurso del proceso de fabricación de MDF existen variables que son considerables, donde el inadecuado control frente estas podría significar el aumento de rechazos al final de la línea de producción.

- Especie de madera:

La principal materia prima en este proceso es la madera, la calidad de esta influye directamente en el producto final, lo anterior se debe a que existe una gran cantidad de especies de madera con cuantiosas propiedades individuales, que otorgan propósitos particulares según su utilización (Feliú Jarpa, 2012).

Un estudio realizado en Masisa S.A sobre de *Eucalyptus nitens* “Ensayos a escala industrial, manteniendo los parámetros de producción constantes como se establecen para la producción de *Pinus radiata*”. Evidenció que el utilizar *E. nitens* produce una distribución de tamaños de fibras significativamente diferente, esto se debe a que las condiciones del proceso están adaptadas al procesamiento de *P. radiata*. Además, se encontró un aumento de cantidad de haces de fibra, *shives*, los cuales son indeseables para la fabricación de tableros, ya que influyen de manera negativa en la calidad de la superficie del tablero y también en su respuesta al fresado (Gorrini, Poblete, Hernandez , & Dunn, 2003).

- Resina adhesiva:

Existe un abanico variado y diferente de adhesivos. La principal causa de este fenómeno de superficie, radica en que las moléculas del material que se pretende unir son diferentes a las moléculas del adhesivo que forma la línea de cola. La mayoría de los adhesivos empleados hasta ahora en la fabricación de tableros son termoendurecibles, sin embargo, entre ellos hay diferencias específicas que otorgan características distintas a los tableros (Pizzi, 2015).

Las resinas sintéticas son un agente clave para la fabricación de tableros de fibras, las más utilizadas son de tipo: fenol-formaldehído (PF), urea-formaldehído (UF), melamina-urea-formaldehído (MUF), e isocianato (IC). En Masisa S.A. la resina utilizada es de tipo urea-formaldehído, este tipo de resina es termoendurecible perteneciente a la familia de polímeros denominada aminoplastos. Además, presenta una serie de ventajas entre las que destacan: bajo costo, su solubilidad en agua, la resistencia a los microorganismos y a la abrasión, así como también destaca por su resistencia térmica, su transparencia y ausencia de color (Estévez Bolívar, 2012).

- Aditivos:

Para el proceso de elaboración MDF se pueden utilizar variados aditivos con el objetivo de optimizar el proceso en cuanto a calidad, efectividad de la resina, u otros. La emulsión de tipo parafínica es utilizada para controlar la estabilidad dimensional del producto a las condiciones de humedad relativa del ambiente.

Por otro lado, se utiliza un secuestrante, este aditivo también conocido como agente quelante, evita la toxicidad de los metales pesados para los seres vivos, la utilización de este producto permite la reducción del contenido de formaldehído, logrando un control sobre sus emisiones (Estévez Bolívar, 2012).

- Humedad:

La humedad es una variable considerable en el proceso de MDF, desde la obtención de la madera prima, hasta el proceso final de almacenamiento. El contenido de humedad determina la resistencia general y la durabilidad del tablero, así como también el factor apariencia/calidad de la superficie.

De manera análoga, Heiko et al. en el libro *Wood Based Panels* menciona que la cantidad de humedad tiene una fuerte influencia en la mayoría de las propiedades de la madera, al aumentar el contenido de humedad en equilibrio, propiedades como la resistencia, el módulo de elasticidad, y la dureza disminuyen considerablemente.

En la obtención de la materia prima, los árboles recién cortados presentan un alto contenido de humedad, el que varía según la especie, la estación del año, la región geográfica, y el lugar de crecimiento del árbol. Según Rudiger Albin et al, en su investigación basada en observaciones sobre la variación del contenido de humedad en madera industrial astillable de *Pinus radiata*, el contenido de humedad influye en el transporte, flotabilidad, en el proceso de secado e impregnación y en la transformación mecánica de la madera. Por ejemplo, para tableros de partículas, el contenido de humedad deseable durante el proceso se encuentra en un rango entre 30 a 50% en base seca, en este límite se presenta un bajo consumo de energía, un porcentaje de polvo menor, y además el consumo de combustible para el secado de la fibra no es excesivo (Albin A. & Jaramillo L., 1980).

Por otro lado, Zhyong Cai et al. comprobaron el efecto de la densidad del panel y la cantidad de humedad en el manto en la producción de MDF, específicamente en el área de prensado, encontrando que tanto la densidad como el contenido de humedad del manto de fibra, tienen efectos significativos sobre la presión interna del vapor y la unión interna de la resina. Además, el análisis realizado indicó que el manto de fibra con un contenido de humedad optimizado dependía de la densidad del panel. Para paneles de baja densidad, 673 kg/m³; el contenido de humedad fluctuaba entre 12,1% y 15,3% en

base seca, mientras que para paneles de densidad media y alta, 769 kg/m^3 y 833 kg/m^3 respectivamente, el rango de contenido de humedad se redujo (Cai, Muehl, & Winandy, 2006).

Según Pedro Reis, quien realizó un estudio sobre la optimización del proceso de secado y el transporte de fibra, indicó que no sólo la humedad de las fibras influyen en el proceso de prensado. De la misma manera, el tiempo de prensado se ve influido por parámetros como la temperatura, el grosor del panel, las características de la resina, y la humedad de las fibras. Además, explica que durante el prensado, el calor inicial se transfiere desde la prensa a las capas exteriores del colchón de fibra, migrando al núcleo del manto por conducción. El calor aumenta la temperatura de las fibras del colchón, plastificándolas, y es en este punto donde se activa el curado de la resina, resultando el tablero final. Reis, afirma que el contenido de humedad de las fibras que forman el colchón, puede ser ventajoso, y al mismo tiempo ser perjudicial en el proceso. Un alto contenido de humedad conlleva a que la velocidad de la prensa sea mayor y junto con ello se requiere menor presión de trabajo, siendo así el espesor deseado del panel fácilmente alcanzado. Sin embargo, al aumentar el contenido de humedad, las fibras que constituyen las caras del colchón provocan un aumento de transferencia de calor de la prensa al núcleo del tablero, fenómeno que se denomina golpe de vapor (*Steam shock*), no obstante, el tiempo de curado de la resina puede verse impedido por el exceso de humedad, ya que el flujo de calor hacía el núcleo es casi nulo.

Las ventajas de un bajo contenido de humedad se ven reflejadas en las características finales del panel, tales son:

- Mejor resistencia a la tracción
- Menor tiempo de prensado
- Perfil de densidades más uniforme

Por otro lado, las desventajas son:

- Elevada capacidad de absorción de agua, junto con ello un aumento del hinchamiento en el tablero final.
- Desestabilidad en el espesor, debido a la baja adherencia fibra-resina, es decir, baja plastificación de las fibras.
- Reducido índice de transferencia de calor en el núcleo del colchón.

Dado lo anterior, y de acuerdo a lo indicado por teoría, la humedad del colchón de fibra debería bordear 9 a 12% en el proceso de elaboración de MDF (Reis, 2008). Un estudio sobre la influencia de la humedad del manto de fibra en las propiedades de los tableros MDF, realizado en Polonia, evidenció que el aumento del contenido de humedad de las fibras desde un 6,5 a un 10,5%, aumenta el módulo de ruptura en aproximadamente un 9%, el módulo de elasticidad en un 7%, mejora de interacción de los enlaces internos fibra-fibra en aproximadamente un 30%, y además reduce el hinchamiento del tablero en alrededor de 22% (Nicewicz & Monder , 2014).

3.4 Condensación de vapor de agua

El diagrama de fases del agua evidencia de manera sencilla el concepto de condensación de vapor de agua, ver Figura 2, en él se describen los cambios de fase: líquido-vapor, líquido-sólido, y sólido-vapor. En particular, la condensación de vapor de agua se logra cuando un gas se encuentra a una temperatura y presión "A" en el diagrama de fases, cuando este gas disminuye su temperatura, es decir, se enfría a presión constante hasta alcanzar la línea de coexistencia líquido-vapor, es en el punto "B" donde aparece el primer condensado en el gas, lo que se traduce en la temperatura de punto de rocío, PR.

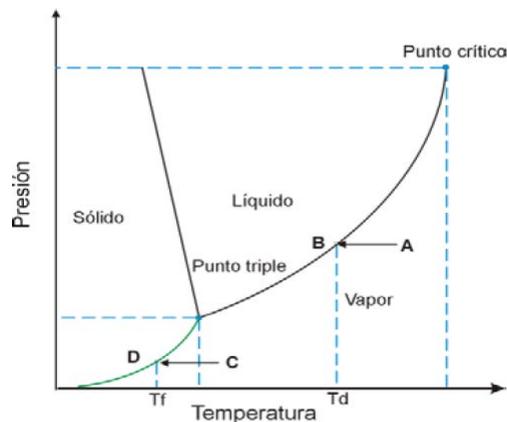


Figura 2. Diagrama de fases del agua (*Fuente: Centro Nacional Metrología*).

Lo anterior se explica cuando la presión de vapor de agua (PV) es mayor que la presión de vapor de saturación (PVS). Así, el ambiente se vuelve propicio para que ocurra el fenómeno de condensación, siendo la causa principal el aumento de la presión de vapor de un sistema o bien, una disminución de la presión de vapor saturado. Un descenso PVS implica la disminución de temperatura, los mecanismos de enfriamiento de la atmósfera pueden ser varios: Mezcla de masas de aire húmedo a diferente temperatura, por contacto con una superficie fría, o enfriamiento adiabático.

De modo que exista un ambiente propicio para la formación de gotas, es necesario que existan núcleos de condensación, también denominadas partículas higroscópicas por su capacidad para absorber humedad. En caso de que no existan partículas de este tipo, el agua puede permanecer en forma de vapor incluso cuando la presión de vapor sea mayor que la presión de vapor de saturación (Márquez Rubio, 2016).

3.4.1 Carta psicrométrica

Para una mejor comprensión de las variables asociadas al fenómeno de condensación, es necesario entender la carta psicrométrica del aire, ver Anexo 1, la cual describe la relación entre las variables de humedad relativa, el contenido de humedad, la temperatura de bulbo seco y húmedo, la temperatura de punto de rocío, entre otras.

Teniendo el conocimiento de dos propiedades del aire, se pueden conocer las demás cualidades. (Flores Vázquez, 2017).

- Temperatura de bulbo seco ($T_{b.s.}$) y Temperatura de bulbo húmedo ($T_{b.h.}$)

La $T_{b.s.}$ es la temperatura que se mide empleando un termómetro común, teóricamente, es una indicación del calor sensible contenido en una sustancia (Berg, 2016), mientras que la $T_{b.h.}$ es la temperatura que se mide utilizando un termómetro que tiene su bulbo inmerso en un material húmedo. La temperatura de bulbo húmedo siempre es menor que la temperatura de bulbo seco, en el caso de que ambas temperaturas fuesen iguales; la humedad relativa es del orden del 100% (Kahan, 2004).

- Humedad Relativa (HR)

La humedad relativa se define como la relación existente entre la cantidad de humedad que el aire contiene en un determinado sistema y la máxima cantidad de humedad que el aire puede contener a la misma temperatura (Dávila P. & Martines L., 2016). A su vez algunos autores definen humedad relativa como la relación entre la presión parcial de vapor en un aire húmedo y la presión de vapor saturado a la misma temperatura, ver ecuación (1).

$$HR = \left(\frac{P_v}{P_{v,sat}} \right)_T \quad \text{ecuación (1)}$$

Donde P_v y $P_{v,sat}$ se expresan en kPa.

- Temperatura de punto de rocío (PR)

La temperatura de punto de rocío o también denominada temperatura de saturación: es la temperatura a la que una mezcla dada de vapor de agua y aire se satura (Perry, Green, & Maloney, 1934).

La aparición de pequeños hilos de fibra empapados de agua (grumos) son más frecuentes en zonas donde la fibra realiza su transporte con menor velocidad. Por ejemplo, en el proceso de secado de la fibra, lo anterior significa que el aire logró llegar al punto de rocío, dicho de otras palabras el aire se encuentra en su punto de saturación. Cuando el aire llega a su límite de capacidad para retener el vapor de agua a una humedad relativa del 100%, el agua condensa en pequeñas gotas sobre una superficie determinada (Estévez Bolívar, 2012).

Cuanto más cerca del 100% se encuentre la humedad relativa de un gas, a una temperatura determinada, más cerca estará esta temperatura del punto de rocío. El punto de rocío si bien se puede estimar mediante el diagrama psicrométrico, también puede ser calculado, ver ecuación (2).

$$Dp = \sqrt[8]{\frac{HR}{100}} * (112 + 0,9T) + (0,1T) - 112 \quad \text{ecuación (2)}$$

Donde, Dp corresponde a la temperatura del punto de rocío, T es la temperatura ambiente (°C) y HR es la humedad relativa (%) (Duque Coronel, 2016).

3.4.2 Condiciones ambientales

En un ambiente confortable no se perciben fluctuaciones de temperatura o corrientes de aire que interfieran en un proceso en particular. Néstor Fonseca et al. estudiaron el acondicionamiento de aire mediante sales disecantes en climatización de recintos. Es por ello que el uso de sistemas de acondicionamiento de aire se ha hecho necesario en las regiones tropicales húmedas a pesar de los altos costos que conlleva emplear este tipo de sistemas. Por esta razón, se debe controlar en lo posible, tanto la temperatura ambiente y el contenido de humedad del aire, asegurando algunos de los parámetros de calidad en los procesos industriales (Fonseca Diaz, Niño Serna, & Gutiérrez, 2009).

3.5 Concepto de transferencia de calor

La transferencia de calor es el intercambio de la forma sensible y latente de la energía interna entre dos medios, como resultado de una diferencia de temperatura. La cantidad de calor transferido por unidad de tiempo se denomina razón de transferencia de calor (\dot{Q}), mientras que la transferencia de calor dada por unidad de área se llama flujo de calor (\dot{q}). Existen tres tipos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación, ver Tabla 1 (Çengel, 2007).

Tabla 1. Tipos de transferencia de calor.

<p>Conducción</p>	<p>Transferencia de energía térmica de las partículas más energéticas de un medio hacia las menos energéticas adyacentes, ver ecuación (3).</p> $\dot{Q}_{Cond.} = -kA \frac{dT}{dx} \quad \text{ecuación (3)}$ <p>Donde, $\dot{Q}_{Cond.}$ es calor transferido por conducción (W), la constante de proporcionalidad k es la conductividad térmica del material (W/mK), A es el área de transferencia de calor (m²), $\frac{dT}{dx}$ es el gradiente de temperatura con respecto al espesor del material.</p>
<p>Convección</p>	<p>Transferencia de calor entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacentes que se encuentran en movimiento, ver ecuación (4).</p> $\dot{Q}_{Conv.} = h A_s (T_s - T_\infty) \quad \text{ecuación (4)}$ <p>Donde, $\dot{Q}_{Conv.}$ es el calor transferido por convección (W), el coeficiente de convección (W/m²K), A_s es el área superficial (m²), T_s y T_∞ son la temperatura de la superficie, y del fluido, respectivamente (K).</p>
<p>Radiación</p>	<p>Energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas, y se describe según la ecuación (5).</p> $\dot{Q}_{Rad.} = \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{alred}^4) \quad \text{ecuación (5)}$ <p>Donde, $\dot{Q}_{Rad.}$ es el calor transferido por radiación (W), ε es la emisividad de la superficie, la constante de Stefan-Boltzmann σ es $5,67 \times 10^{-8}$ (W/m²K⁴), A_s es el área superficial (m²), T_s y T_{alred} temperaturas termodinámicas (K)</p>

La radiación suele ser significativa con relación a la conducción o a la convección natural, pero despreciable con relación a la convección forzada. Por tanto, en términos de este estudio, se consideró la radiación como despreciable. Así, la transferencia de calor por conducción, convección, se pueden explicar en términos de la resistencia térmica, la cual depende de la configuración geométrica y de las propiedades térmicas del medio por el cual ocurre la transferencia. En la Tabla 2, se visualizan las ecuaciones antes mencionadas de transferencia de calor en términos de la resistencia térmica.

Tabla 2. Conducción y radiación en términos de la resistencia térmica.

Conducción	$\dot{Q}_{Cond.} = \frac{T_1 - T_2}{R_{pared}} \quad \text{ecuación (6)}$ <p>Donde, $\dot{Q}_{Cond.}$ es el calor por conducción (W), T_1 y T_2 son las temperaturas de la pared de un material (K), R_{pared} es la resistencia a la conducción de una pared plana (K/W).</p> $R_{pared.} = \frac{L}{kA} \quad \text{ecuación (7)}$ <p>Donde: L es el largo de pared (m), k es la conductividad térmica en (W/mK), A es el área superficial (m²).</p>
Convección	$\dot{Q}_{Conv.} = \frac{T_s - T_\infty}{R_{Conv.}} \quad \text{Ecuación (8)}$ <p>Donde, $\dot{Q}_{Conv.}$ es el calor por convección (W), T_s y T_∞ en (K) es la temperatura superficial en la pared y temperatura del fluido, respectivamente. $R_{Conv.}$ es la resistencia a la convección (K/W).</p> $R_{Conv.} = \frac{1}{hA_s} \quad \text{ecuación (9)}$ <p>Donde, h es el coeficiente de convección (W/m²K), y A_s es el área superficial (m²).</p>

En la práctica se encuentran paredes planas que constan de varias capas de materiales diferentes con el objetivo de aislar térmicamente las instalaciones. La

transferencia de calor de las paredes compuestas, también son analizadas bajo el concepto de resistencia térmica, ver Figura 3.

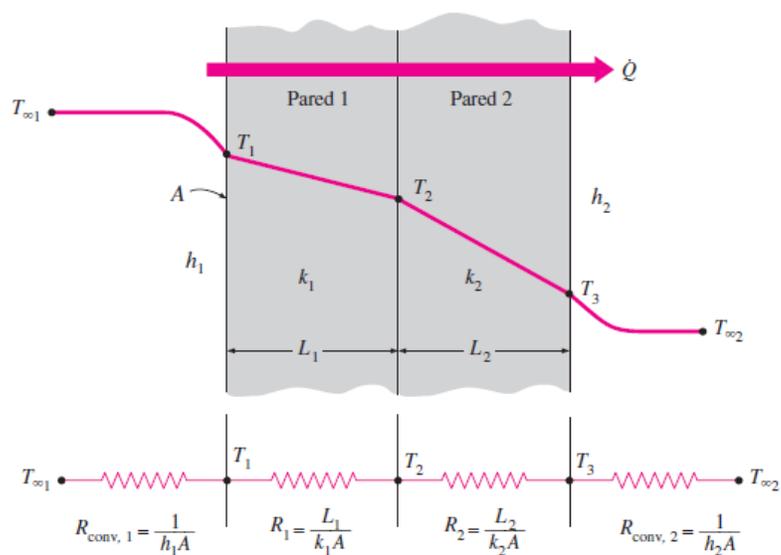


Figura 3. Red de resistencias térmicas en una pared plana (Fuente: Çengel, 2007).

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

- Analizar las variables de proceso que están involucradas en el fenómeno de condensación de vapor de agua en silos y ductos de manejo de fibra de madera y proponer alternativas de mejora.

4.2 Objetivos específicos

- Determinar y analizar las variables involucradas en el fenómeno de condensación de vapor de agua.
- Determinar posibles alternativas de mejora al problema planteado por la empresa.

5. METODOLOGÍA

Para dar cumplimiento a los objetivos planteados, se debe considerar lo siguiente:

5.1 Recursos, materiales y equipamiento

Con respecto al análisis de las variables implicadas en el estudio, se aplicó una encuesta mediante un *software* online, *Survio*, donde se consultó de manera general por la condensación de vapor de agua en tableros, esto con el fin de interpretar si cada operador según su experiencia tiene el mismo parecer respecto de esta problemática, con ello obtener una visión objetiva del problema.

Por otra parte, para comprender mejor el comportamiento de las variables de temperatura amb., HR, y temperatura de la fibra sobre su efecto en la condensación de vapor de agua, se utilizaron dos tipos de registradores digitales, en la Tabla 3 se encuentra el modelo, su respectiva descripción, y además de los materiales necesarios para su funcionamiento, la data técnica de los dispositivos se encuentra en el Anexo 2.

Tabla 3. Dispositivos y materiales para el registro de datos.

Dispositivo / material	Descripción	Cantidad	Fabricante	Figura representativa
Hobo ux100-011	Registrador digital de temperatura ambiente y humedad relativa	2	Onset	
Hobo ux100-014m	Registrador digital de temperatura interna	4	Onset	
Conector termopar tipo J	Aplicaciones de medición de temperatura	4	RS PRO	
Cable termopar tipo J	Aplicaciones de medición de temperatura	4 (60 cm cada cable)	Omega	

Es necesario mencionar que para la realización del registro de datos mediante el dispositivo Hobo ux100-014m, es indispensable contar con un cable termopar tipo J para poder registrar datos de manera óptima, la carencia de este cable implica el no registro de datos. En cuanto a la extracción de datos de cada uno de los dispositivos, se utilizó el software "Hoboware", el cual viene predeterminado para este tipo de equipos.

5.2 Procedimiento

5.2.1 Apreciación del personal de la línea MDF frente a la problemática.

La encuesta de apreciación del personal de la línea MDF se realizó de manera anónima y mediante internet, así se envió de manera online a 20 personas. Las preguntas realizadas en la encuesta fueron las siguientes:

1. ¿Por qué cree usted que se producen manchas en los tableros?.
2. Cuando se presentan manchas por gotas en tableros, ¿Dónde cree usted que se generan las manchas en el proceso?.
3. Este tipo de manchas, ¿En qué tableros es más visible?.
4. Aproximadamente, ¿Cuántos tableros son rechazados por esta condición de manchas por gotas debido a la condensación de vapor de agua?.
5. Según su experiencia, ¿Cree usted que el recubrimiento de manta elastomérica en partes como el silo de fibra ayuda a evitar este tipo de problema?.
6. Si usted tuviera que hacer algún sugerencia sobre la problemática, ¿Cuál sería?

Cabe mencionar, que en la primera pregunta se adjuntó una imagen de tableros manchados por condensación, ver Figura 4.

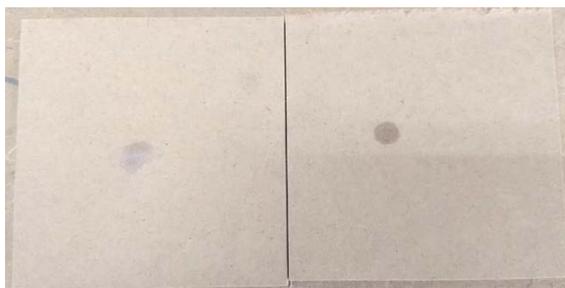


Figura 4. Tablero delgado manchado por condensación de vapor de agua.

5.2.2 Registro, y obtención de datos

Como se explicó anteriormente en el planteamiento del problema, la investigación se orientó al área de manejo y el silo de fibra, ya que en este punto es más propicia la condensación de vapor de agua. En cuanto a la adquisición de datos, los dispositivos se situaron durante 3 días continuos, la ubicación de cada uno de los dispositivos se muestra en la Figura 5. En los puntos T_1 , T_2 , y T_3 se utilizó el modelo Hobo ux100-014m, mientras que en el silo de fibra se utilizó 2 dispositivos del modelo Hobo ux100-011 tanto en el interior como en el exterior de éste. La distribución de los dos tipos de dispositivos fue realizada considerando dos factores: la accesibilidad para la ubicación de estos, y las áreas donde es susceptible la condensación de vapor de agua.

Por otro lado, los datos de referencia de la sala de operaciones fueron representados por Δ en la Figura 5, estos son el contenido de humedad en g/kg de aire seco en la cinta transportadora y la temperatura en el silo de fibra.

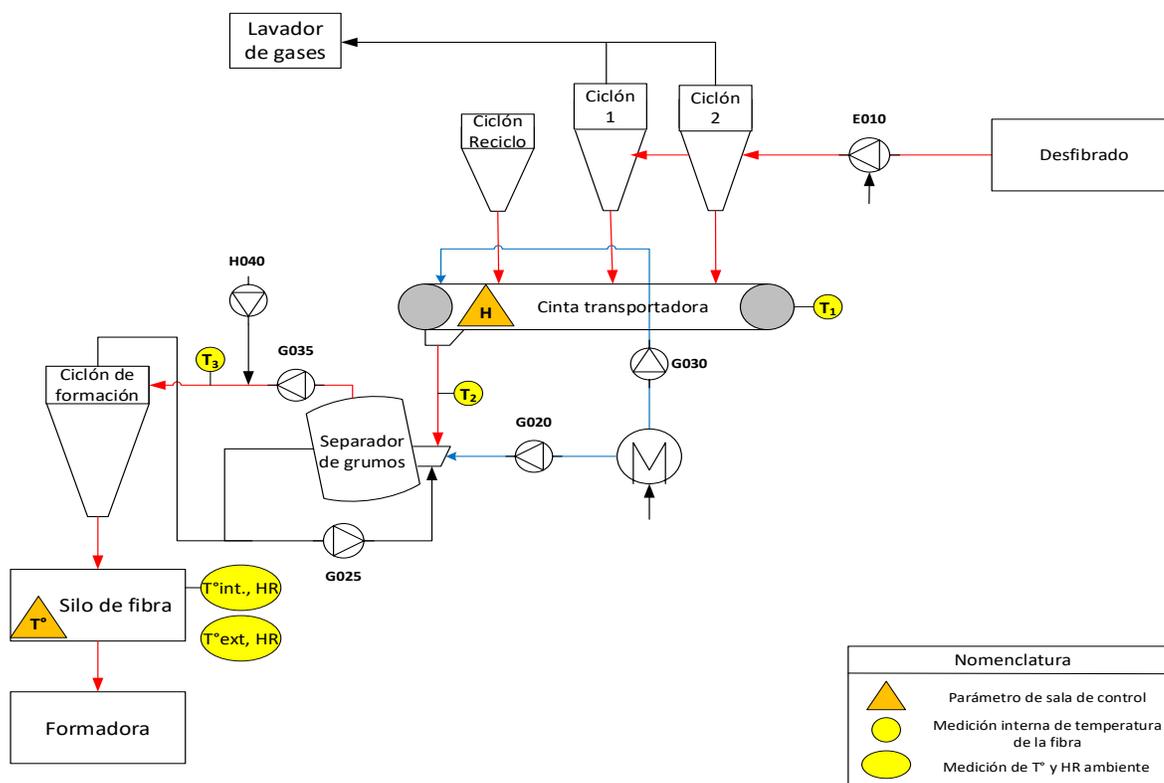


Figura 5. Diagrama de mediciones en el área de secado/ silo de fibra.

5.2.3 Desarrollo de balance de materia y energía

Se desarrolló un balance de masa de materia y energía en el intercambiador de calor, el cual permitió determinar el flujo necesario de aceite térmico para aumentar la temperatura de los ductos. El balance de materia y energía considero lo siguiente, ver Figura 6.

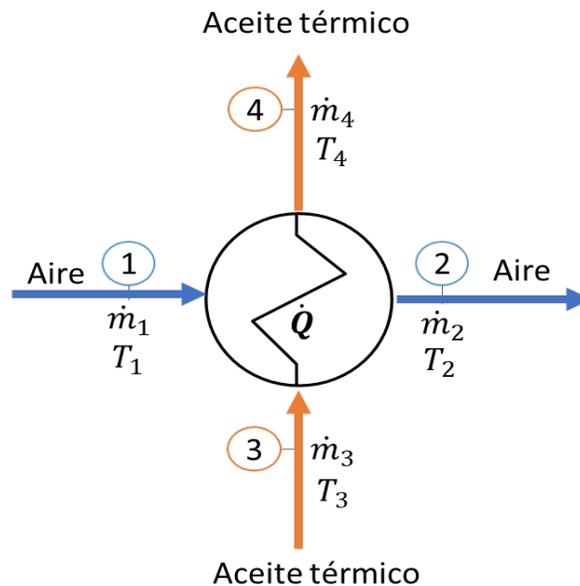


Figura 6. Diagrama intercambiador de calor.

En donde el fluido frío corresponde al aire atmosférico utilizado para el transporte neumático de la fibra, y el fluido caliente corresponde al aceite térmico. Se considero las siguientes suposiciones para el balance de masa:

- Estado estacionario ($\frac{\partial m}{\partial T} = 0$)
- El flujo de entrada del fluido frío es el flujo correspondiente a la descarga de los ventiladores G20 y G30, ver Figura 5. ($\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_{\text{aire}}$)
- Se considero la temperatura ambiente como la temperatura mínima crítica, datos que fueron proporcionados por la estación meteorológica de Masisa S.A.

Por otro lado, el balance energético consideró:

- No hay acumulación ($\frac{\partial \hat{E}_m}{\partial T} = 0$)
- No hay energía cinética ni potencial ($\hat{E}_c = 0, \hat{E}_p = 0$)
- No hay trabajo ($W = 0$)

En primera instancia se determinó el calor necesario para incrementar la temperatura del aire atmosférico, ver ecuación (10)

$$\dot{Q} = \dot{m}_{\text{aire}} * C_p * \Delta T \quad \text{ecuación (10)}$$

Así, el balance de masa queda de la siguiente manera, ver ecuación 11:

$$\frac{\partial \dot{m}}{\partial t} = \dot{m}_1 + \dot{m}_3 - \dot{m}_2 - \dot{m}_4 \quad \text{ecuación (11)}$$

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 = \dot{m}_{A.T.} \quad \text{ecuación (12)}$$

Mientras que el balance de energía se planteó de la siguiente forma, ver ecuación (13 y 14), considerando las suposiciones ya mencionadas:

$$\frac{\partial(\hat{E}_m)}{\partial t} = \sum_{\text{Entra}}[(\hat{H} + \hat{E}_c + \hat{E}_p) * \dot{m}] - \sum_{\text{Sale}}[(\hat{H} + \hat{E}_c + \hat{E}_p) * \dot{m}] + \dot{Q} + \dot{W} \quad \text{ecuación (13)}$$

$$0 = \dot{m}_{\text{aire}} * (\hat{H}_1 - \hat{H}_2) + \dot{m}_{A.T.} * (\hat{H}_4 - \hat{H}_3) + \dot{Q} \quad \text{ecuación (14)}$$

Despejando el flujo másico de aceite térmico, $\dot{m}_{A.T.}$, se tiene, ver ecuación (15)

$$\dot{m}_{A.T.} = \frac{\dot{Q} - \dot{m}_{\text{aire}} * (\hat{H}_1 - \hat{H}_2)}{\hat{H}_4 - \hat{H}_3} \quad \text{ecuación (15)}$$

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Recopilación de información, mediante la encuesta realizada por *Survio*

A modo de enfrentar y entender el problema de fondo, en primera instancia se consideró el criterio de los operadores de la línea de proceso MDF, ya que son ellos los encargados de realizar un control adecuado para otorgar la calidad al producto y la satisfacción al cliente. De esta manera, la encuesta fue empleada a 20 personas, entre operadores y jefes de turno, de los cuales respondieron 14 personas.

En cuanto a la pregunta sobre la causa de la manchas en los tableros, el 78,57% de los encuestados concordaron en que las manchas están relacionadas con el fenómeno de condensación de vapor de agua, el 14,28% indicó que la aparición de gotas se debe a la condición climática, mientras que el 7,14% no respondió a la pregunta, ver Figura 7.

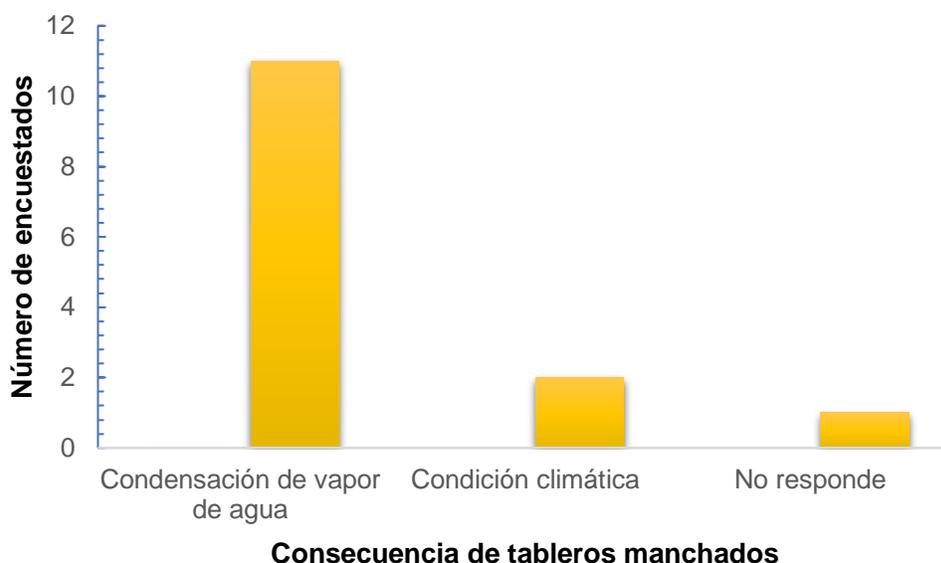


Figura 7. Apreciación de la causa de los tableros MDF manchados.

A su vez, los encuestados enfatizaron que este problema se genera a partir de diferencias de temperaturas entre la línea de producción y el ambiente exterior. De forma teórica y dentro de los factores que afectan la condensación de vapor de agua, esta

depende de la condición climática en la que se esté operando el proceso. La condensación es una transformación de cambio de fase que está presente en la naturaleza de forma diaria, y por lo general es más común visualizar el fenómeno durante estaciones frías, como en invierno (Velázquez, 2019).

Por otro lado, frente a la inquietud “Cuando se presentan manchas por gotas en tableros, ¿Dónde cree usted que se genera la condensación de vapor de agua en el proceso?” La percepción respecto de la zona de generación de las gotas según los encuestados, indicó que en un 72% esta se produce de manera más frecuente en el silo de fibra, un 14% enfatizó en la cinta de secado, y un 7% los ductos del proceso, el 7% restante se refirió a la opción “otros” como las aspiraciones deficientes en algún punto del proceso.

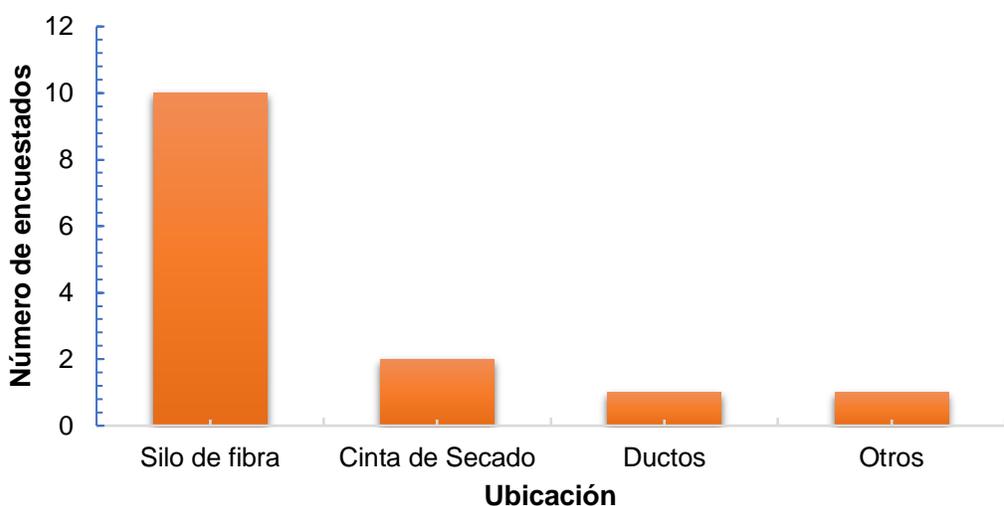


Figura 8. Percepción de la zona de generación de gotas según operadores MDF.

Con referencia a la interrogante ¿En qué tipo de tableros las manchas se manifiestan de manera más frecuente? En la Figura 9, se visualiza la respuesta de los encuestados, los cuales indicaron que esta alternación en la producción de tableros a causa de la condensación de vapor de agua se presenta de manera más usual en tableros delgados (57,14%), dado que el espesor de este tipo de producto es inferior por lo que son más notorias las manchas.

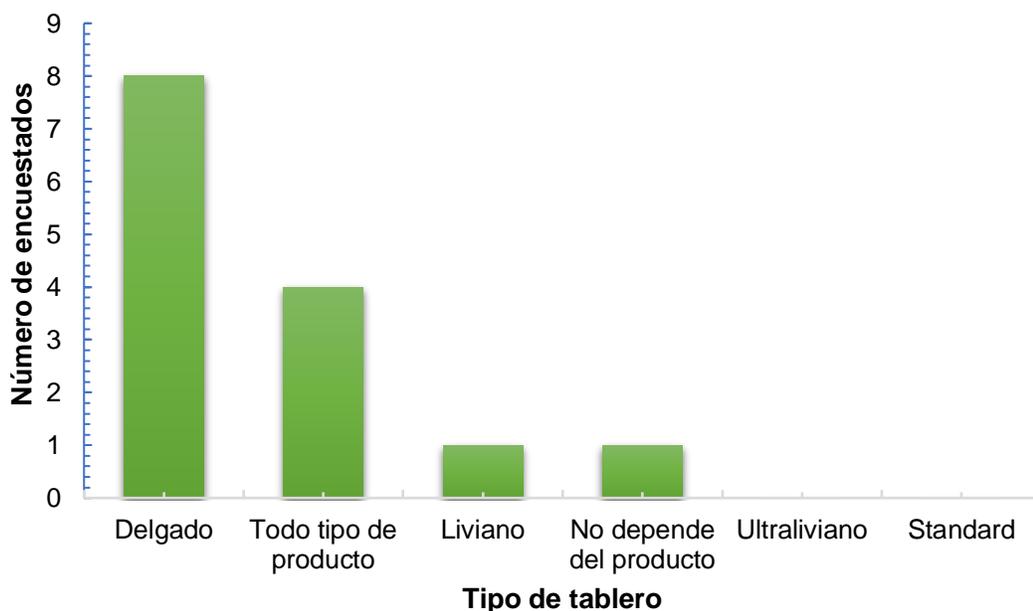


Figura 9. Frecuencia de manchas según el tipo de tablero fabricado.

Respecto a la pregunta planteada sobre la cantidad de tableros rechazados a causa de la condensación de vapor de agua, gran parte de los encuestados apuntó a que se podrían ver perjudicadas producciones completas, siendo este tipo de problema relativo en cuanto a la cantidad específica de rechazos, ya que depende del tipo de tablero que se esté procesando, por lo general compete a los tableros delgados. A su vez, se señaló que la cantidad de rechazos fluctuaba entre 10 m³ a 40 m³ de la producción mensual, por lo que mediante este rango se determinó la pérdida monetaria aproximada que conlleva la problemática principal, en promedio 1 m³ de rechazo implica el costo unitario de 315 USD, esta cifra es un promedio estimativo debido a que este valor varía respecto del tipo de producto. En la Tabla 4, se visualiza la estimación del costo unitario por m³.

Tabla 4. Costo unitario estimativo equivalente a la producción MDF.

Costo unitario/ m ³	\$USD
10 m ³ /mes	3150
40 m ³ /mes	12600

En otro aspecto, los encuestados mencionaron que desde su conocimiento y experiencia en el proceso, el recubrimiento que se encuentra en el silo de fibra compuesto por una manta elastomérica efectivamente sirve para mitigar el fenómeno de condensación, porque logra una disminución en cuanto a la diferencia de temperatura interior del silo de fibra respecto de la temperatura ambiente.

De manera de concluir el análisis de la encuesta realizada, los encuestados plantearon sugerencias y/o comentarios en relación al problema en cuestión, señalando que para enfrentar este tipo de problema se debe mejorar la aislación térmica de los silos y ductos con materiales adecuados, adicionalmente se mencionó la posibilidad de calefaccionar el área de la línea de producción.

6.2 Análisis de registro de datos

6.2.1 Condiciones ambientales

Considerando el aporte de aire húmedo al proceso, es necesario realizar un análisis de la temperatura ambiente y la humedad relativa en la zona de Cabrero, ver Figura 10, los datos fueron proporcionados por la unidad de meteorología ubicada en Masisa S.A.

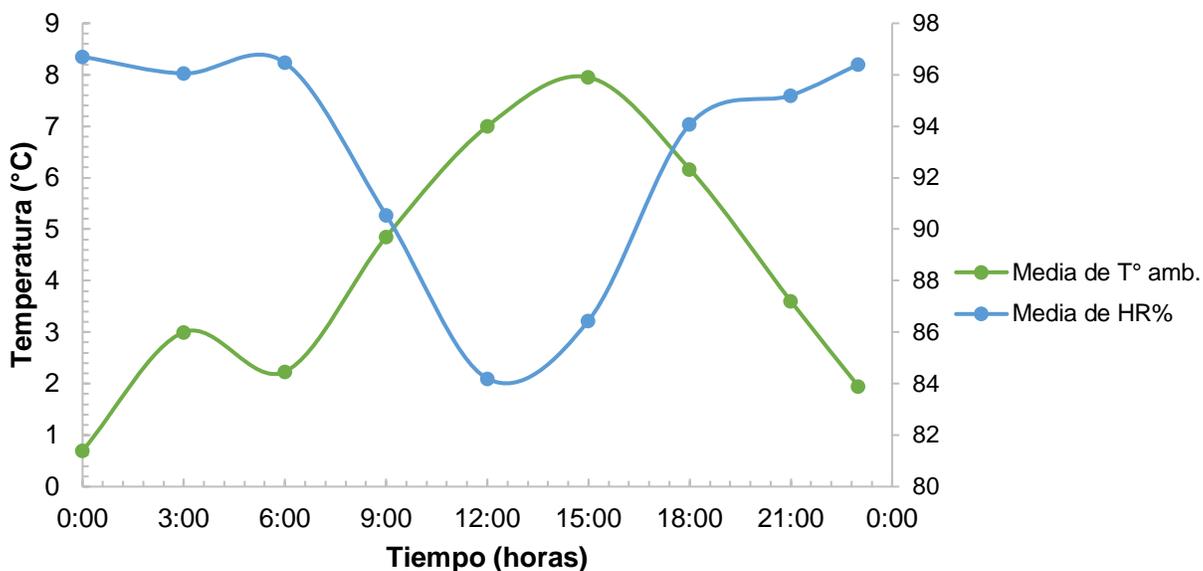


Figura 10. Efecto de la temperatura ambiente y la humedad relativa según media horaria.

En cuanto al comportamiento de la temperatura ambiente (T° amb.) este tiende a ser oscilatorio, puesto que desde las 6:00 am la temperatura se incrementó de manera exponencial, alcanzando su peak a las 15:00 hrs donde se registraron 7,95 °C a una humedad relativa del 86,4%. Luego de esta hora, la temperatura descendió progresivamente hasta alcanzar 1,9 °C a las 23:00. La media de temperatura más baja se registró a las 00:00 hrs alcanzando los 0,7°C con un 96,7%.

La humedad relativa (HR%) tiene un comportamiento en relación con la temperatura ambiental, esto ya que el aire puede contener una cantidad máxima de vapor de agua que depende exclusivamente de su temperatura (Obando, 2014). Al incrementar la temperatura de 2,26 °C a 7,95 °C, como se visualiza en la Figura 10, la humedad relativa disminuye notoriamente desde los 96,7% a los 84,4%.

6.2.2 Comportamiento de la temperatura interna de los ductos

De acuerdo a la metodología descrita anteriormente, se obtuvieron datos de temperatura interna de los ductos en el transcurso de tiempo de 3 días durante el mes de junio, ver Figura 11.

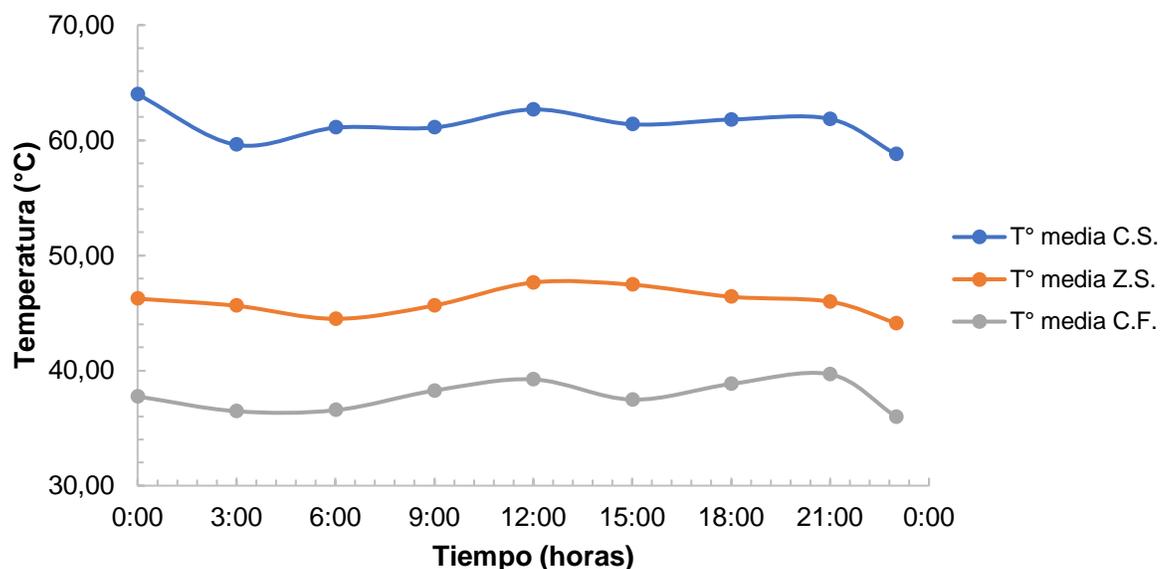


Figura 11. Seguimiento de temperatura interna del proceso, según media horaria.

La temperatura media de la cinta de secado en la Figura 11 (C.S.) fluctúa entre los 58,78 a 63,98 °C alcanzando el peak de temperatura a las 00:00 am, luego la temperatura promedio en el separador de grumos (Z.S.) se encuentra en un rango de 44,11 a 47,64 °C donde el peak de la máxima temperatura en este punto es a las 12:00 pm. Este descenso brusco de temperatura entre la C.S. y el Z.S. tiene dos causas: la primera es que la fibra viene desde el proceso de secado a una temperatura elevada cercana a los 60°C, y junto con ello el proceso utiliza transporte neumático, este aporte de aire tiene condiciones desfavorables para el proceso en la época invernal, como temperaturas más bajas y una humedad relativa alta, ver punto 6.2.1 de este estudio. Análogamente, la temperatura según la distribución horaria desciende progresivamente desde el separador de grumos hasta el ciclón de formación (C.F.) en donde se aprecia un rango de temperatura de 35,98 a 39,67 °C. En cuanto al silo de fibra, se analizó aparte debido a que las mediciones se realizaron en distintos días.

6.2.3 Condensación de vapor de agua en ductos del proceso

Dado que solo se conoce la temperatura de bulbo seco en el interior de los ductos, se estimó el volumen específico (m^3/kg) mediante una tabla de aire húmedo saturado (TLV, 2019). Así, se utilizó la carta psicrométrica para estimar el resto de las propiedades del aire húmedo, ver Anexo 1. Con respecto a las propiedades de la cinta de secado, no fue posible estimarlas, debido a que la carta psicrométrica no abarca volúmenes específicos superiores a $1,00 m^3/kg$. Las propiedades del aire fueron determinadas para las condiciones mínimas (Mín.) y máximas (Máx.) de temperatura de bulbo seco y sus respectivos volúmenes específicos, ver Tabla 5.

Tabla 5. Propiedades del aire a temperatura de bulbo seco.

Zona	T _{b.s.} (°C) (Mín. / Máx.)	Volumen específico (m^3/kg)	Carta psicrométrica		
			HR (%)	T° _{b.h.} (°C)	PR (°C)
C.S.	58,8 / 64,0	1,14 / 1,21	-	-	-
Z.S.	44,1 / 46,5	0,99 / 1,00	100 / 80	44,1 / 42,7	44,0 / 42,1
C.F.	36,0 / 39,7	0,93 / 0,95	99,3 / 93,5	35,9 / 38,6	35,9 / 38,4

Según la teoría relacionada a la problemática, el fenómeno de condensación tiene lugar, cuando la temperatura superficial interna de los ductos es menor o igual que la temperatura de rocío (Martín Domingo, 2018). Por tanto, se determinó la temperatura superficial interna mediante las resistencias térmicas de los mecanismos de transferencia de calor implicados en el sistema, ver memoria de cálculo en Anexo 3.

Suponiendo estado estacionario para el sistema, el flujo de calor se estableció desde la zona de mayor temperatura, interior de los ductos, hacía la de menor temperatura, el aire atmosférico. La temperatura superficial, se determinó con respecto a la $T_{b.s.}$ mínima promedio, ver Tabla 6, además se estableció la temperatura ambiente constante como condición mínima a $0,7^{\circ}\text{C}$, dado que la condensación es más susceptible a temperaturas bajas.

Tabla 6. Análisis de condensación en ductos, a temperatura de bulbo seco mínima.

Zona	$T_{b.s.}$ (°C) mínima	t.s. (°C)	PR (°C)	Condensación
Z.S.	44,1	42,8	44,0	t.s. \leq PR
C.F.	36,0	33,7	35,9	t.s. \leq PR

A $T_{b.s.}$ mínima, los puntos que presentaron condensación de vapor de agua a las condiciones descritas fueron el separador de grumos y el ciclón de formación, la principal incidencia en esta condición, es el aporte de aire atmosférico mediante transporte neumático hacía los ductos, el cual favorece la aparición de grumos en la fibra antes de que se dé lugar al manto de formación del tablero.

Las gotas de agua se adhieren a la fibra formando grumos, en el caso particular de la condensación en el área del Z.S. a condiciones de temperatura de bulbo seco mínimas, esta no tiene mayor incidencia sobre las manchas de los tableros por condensación, lo anterior se debe a que el separador de grumos cumple la función de limpieza, en el cual las fibras son repercutidas en el interior, logrando que los grumos decanten por gravedad

hacía un tacho recolector. Por lo tanto, si bien la condensación tiene lugar en el Z.S. no tiene repercusión en la línea productiva.

En cuanto a las condiciones de la media de $T_{b.s.}$ ($^{\circ}\text{C}$) máxima, ver Tabla 7, la temperatura superficial interior de los ductos solo es menor que la temperatura de punto de rocío en el ducto del ciclón de formación, la razón principal radica en que esta medición fue realizada en el principio del ducto, habiendo una distancia no despreciable hasta llegar al ciclón de formación, además este ducto posee en tramos aislamiento con lana mineral.

Tabla 7. Análisis de condensación en ductos, a temperatura de bulbo seco máxima.

Zona	$T_{b.s.}$ ($^{\circ}\text{C}$) máxima	t.s. ($^{\circ}\text{C}$)	PR ($^{\circ}\text{C}$)	Condensación
Z.S.	46,5	45,1	42,1	t.s. \geq PR
C.F.	39,7	37,2	38,4	t.s. \leq PR

6.2.4 Condensación de vapor de agua en el silo de fibra

La situación para el silo de fibra se estudió por separado, debido a que no se tenía acceso frecuente al interior del silo. Por esta razón, se registraron datos de temperatura interna durante 12 días continuos cada 3 horas, desde el 7 de junio al 18 de junio. Se realizó el mismo análisis empleando en los puntos anteriores para determinar la presencia del fenómeno de condensación, ver Figura 12.

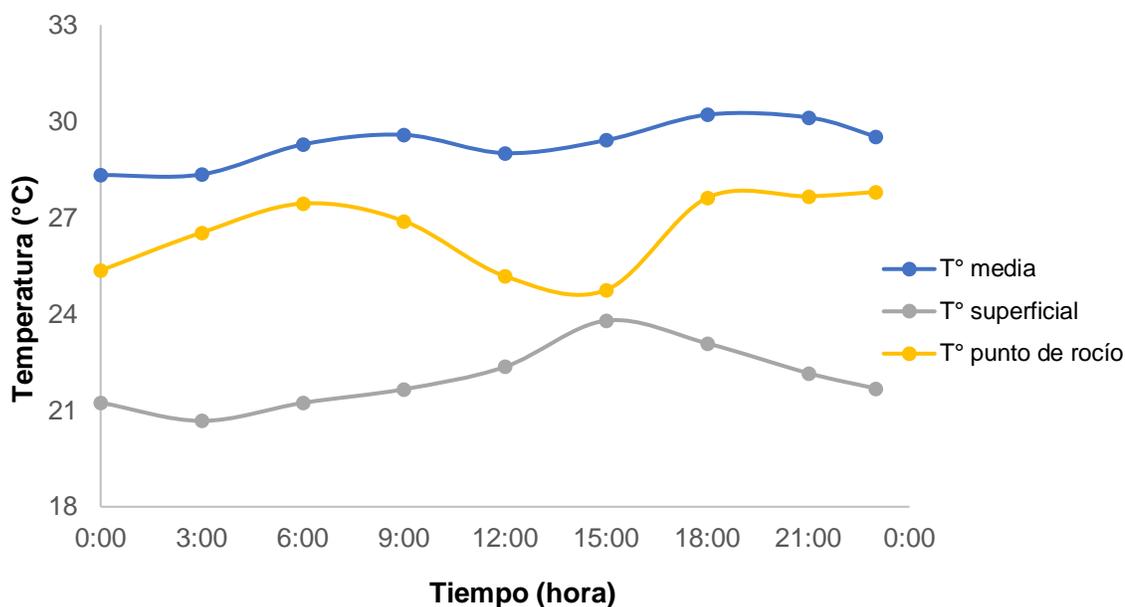


Figura 12. Efecto de la temperatura superficial, la temperatura de bulbo seco, y el punto de rocío en el silo de fibra, según media horaria.

Con respecto a la relación entre la temperatura media del silo de fibra (S.F.), el punto de rocío (PR) y la temperatura superficial (T.s), se determinó la presencia de gotas de condensación en el silo de fibra, encontrando que en toda la media de puntos la condición interior del silo es propicia para producirse el fenómeno en cuestión. Debido a la diferencia de temperaturas del silo de fibra respecto del ambiente, se produce un movimiento de calor desde la superficie que posee mayor temperatura a la de menor temperatura. La magnitud de este intercambio depende de la resistencia térmica que posea el material con el cual está fabricado el silo de fibra.

6.3 Análisis de soluciones frente a la problemática

6.3.1 Aislamiento térmico

Yunus Cengel et al. establece que para la prevención de condensación se debe contar con un aislamiento adecuado, así la temperatura superficial de las paredes asciende por sobre el punto de rocío, evitando la condensación (Çengel, 2007).

En base a la literatura, y considerando lo expuesto por los encuestados, la alternativa que presentó mayor interés fue aislar térmicamente el silo de fibra, así se evaluaron las condiciones del aislamiento térmico actual, y se propusieron otras alternativas de materiales, ver Tabla 8, en donde se visualizan los materiales que se estudiaron y sus respectivas especificaciones.

Los materiales se escogieron por dos motivos principales, por su conductividad térmica, ya que esta propiedad indica la capacidad para conducir el calor, un material aislante suele tener una conductividad térmica más baja. La otra propiedad que se verificó fue la difusividad térmica, la cual relaciona la conductividad térmica, el calor específico y la densidad del material, mientras más pequeño sea el valor de la difusividad, indica que el calor es absorbido por el material. Se propusieron distintos valores de espesores para cada material, con el propósito de verificar cual era el mejor aislante térmico.

Tabla 8. Materiales empleados para aislación térmica del silo de fibra.

Característica / Material	Manta elastomérica	Poliestireno expandido	Poliuretano expandido
Espesores (mm)	40 / 80	40 / 80	40 / 80
Conductividad térmica (W/m*K)	0,0347	0,0384	0,0260
Difusividad térmica (m ² *s)	3,74E-07	5,77E-07	3,55E-07

Además, se realizó un estudio de la condición actual del silo de fibra en base a los materiales que componían la pared plana, en la Figura 13, se visualiza una representación gráfica de la situación actual.

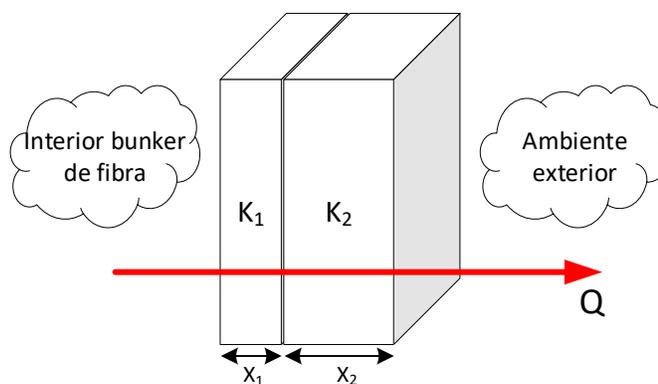


Figura 13. Pared compuesta del silo de fibra, situación actual.

Así, se estimó mediante la ecuación (6) y (7), el calor transferido. Se calculó la temperatura superficial y se comparó respecto del punto de rocío, considerando condiciones de temperatura ambientales mínimas de 0,7 °C. Las condiciones internas se calcularon en base a la humedad relativa, dado que cuando hay condensación esta alcanza un valor de 100%, lo que significa que el ambiente se encuentra saturado, así el valor de temperatura que se considero fue de 28,3 °C a una HR del 100%. En la Tabla 9, se visualiza un resumen de los cálculos realizados.

Tabla 9. Resumen de propiedades de transferencia de calor en el silo de fibra.

Propiedad	Valor
T° interna (°C)	28,3
T° externa (°C)	0,70
PR (°C)	28,28
Temperatura superficial (°C)	27,65
Calor transferido (W)	217,8

La temperatura superficial estimada para las condiciones actuales del silo se situó por debajo de la temperatura del punto de rocío, por lo tanto prevalece la condensación en el silo de fibra. Ahora bien, se evaluaron los materiales contemplados en la Tabla 8, siguiendo el mismo procedimiento de cálculo, en la Figura 14 se visualiza la pared

compuesta considerando la situación de agregar un nuevo material como aislante térmico.

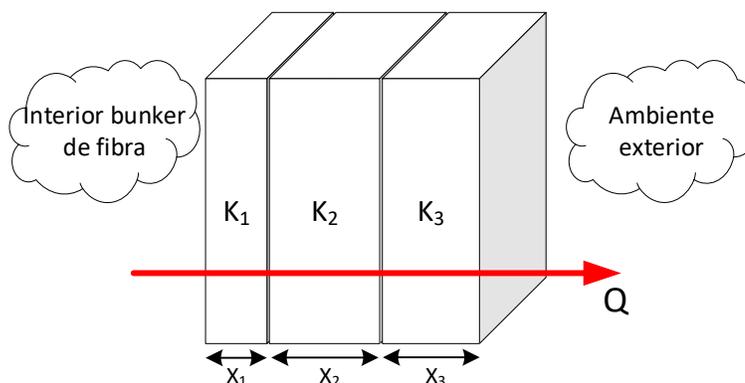


Figura 14. Pared compuesta con alternativa de aislamiento térmico propuesto.

Al momento de evaluar cada uno de los materiales en sus distintos espesores y a las mismas condiciones de temperatura interior-exterior, el fenómeno de condensación continua predominando, aún considerando espesores mayores a 80 mm. En la Tabla 10, se encuentra un resumen de los materiales estudiados, de la temperatura superficial, y del calor transferido, siendo la temperatura del punto de rocío 28,28 °C.

Tabla 10. Análisis de materiales para recubrimiento del silo de fibra.

Material	Espesor (mm)	Temperatura superficial (°C)	Calor transferido (W)
Manta elastomérica	40	27,92	123,67
	80	28,04	86,36
Poliestireno expandido	40	27,91	128,97
	80	28,02	91,61
Poliuretano expandido	40	27,97	107,97
	80	28,08	71,77

A partir de lo anterior, se concluyó que agregar una capa de material si bien ayuda a aumentar la temperatura superficial al interior del silo de fibra, no elimina la problemática de raíz, esto dado que el aire del entorno del silo de fibra se encuentra saturado, debido

a la condición de humedad relativa que se sitúa cercano al 100%. Se analizó la situación de saturación mediante el empleo de la carta psicrométrica, Anexo 1, y se concluyó que para lograr el descenso de la humedad relativa con el objetivo de alejarse de la condición de saturación, lo que se debe hacer es aumentar la temperatura en 3°C manteniendo el contenido de humedad del aire constante. Por tanto, si la temperatura de bulbo seco aumenta de 28,3 a 31,3 °C, estableciendo el contenido de humedad constante en el sistema, la humedad relativa se reduce de 100 a 85%, en esta condición la temperatura de punto de rocío se reduce a 28,16 °C, y al calcular la temperatura superficial alcanza los 30,58 °C, por lo que efectivamente la temperatura superficial es mayor que el punto de rocío, por tanto la condensación de vapor de agua no tendría lugar en el sistema.

6.3.2 Habilitación del intercambiador de calor

Se evaluó la factibilidad de aumentar la temperatura del sistema mediante la utilización de un intercambiador de calor, ver Figura 5, durante la investigación se apreció la existencia de un intercambiador de calor en la planta de MDF, siendo utilizado como transporte neumático para el área de manejo de fibra, mediante el empleo de los ventiladores, G020 y G030. Poner en marcha este intercambiador de calor, permitiría que el transporte neumático de la fibra se realice a una temperatura mayor, en consecuencia a una humedad relativa más baja, por lo que no habría condensación en zonas como el separador de grumos, a la entrada del ciclón de formación y en el silo de fibra.

6.3.2.1 Balance de masa y energía para el funcionamiento del intercambiador de calor

Mediante el desarrollo del balance de masa y energía propuesto en la sección 5.2.3 de este informe, se estimó el flujo volumétrico necesario para incrementar la temperatura del aire en el silo de fibra en 3 °C. Como la temperatura promedio del silo es 28,8 °C, la temperatura interna para evitar la condición de saturación es de 31,8 °C. Sin embargo, para lograr este incremento, se analizó la pérdida de temperatura, ver Figura 11, desde el área del separador de grumos hasta la entrada del ciclón de formación, lo que se

traduce en 8 °C. Considerando la temperatura ambiental mínima medida como 0,7 °C, la temperatura del aire a la cual debiese ingresar al proceso es de 39,8 °C.

Para la puesta en marcha del intercambiador de calor, se consideró el empleo de aceite térmico a 260 °C (Mobil, 2018). Se determinó que el calor necesario para lograr incrementar la temperatura del aire desde los 0,7 °C a los 39,8 °C es de 347,50 kJ/s, mientras que el flujo másico necesario de aceite térmico es 0,087 kg/s, en términos volumétricos el caudal necesario es de 0,39 m³/h, ver memoria de cálculo en Anexo 4.

Cabe mencionar, que este estudio se fundamenta en la condiciones ambientales a temperaturas bajas y humedades relativas altas, es decir, durante la época invernal, la cual contempla los meses de junio a septiembre, por lo tanto la habilitación del intercambiador de calor se recomienda en función de estos meses. Incrementar la temperatura del aire empleado en el transporte neumático en épocas más cálidas como en verano, no conlleva a ningún beneficio para el proceso.

Con el objetivo de controlar la temperatura de salida del flujo de aire mediante la manipulación del flujo de entrada del aceite térmico, el circuito de control que debe ser empleado es el siguiente, ver Figura 15.

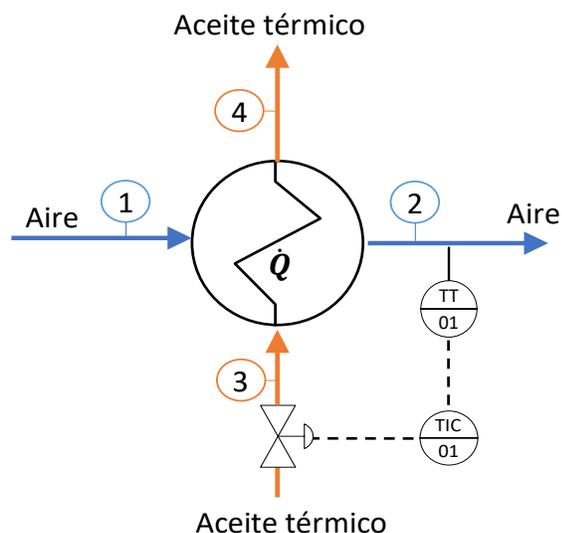


Figura 15. Circuito de control automático de un intercambiador de calor.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

Existe una relación directa entre las condiciones atmosféricas y las condiciones internas de temperatura - humedad relativa de un proceso, las cuales favorecen la naturaleza de la condensación.

En cuanto al análisis de las variables involucradas en el fenómeno de condensación, se encontró que:

- La notoria disminución de la temperatura ambiente y el aumento de humedad relativa en época invernal, influyen directamente en las condiciones internas del proceso, debido a la utilización de transporte neumático mediante aire atmosférico. Por lo que, a menor temperatura ambiente, mayor será la humedad relativa dentro del proceso, favoreciendo así la condición de saturación.
- La condensación de vapor de agua está presente cuando la temperatura superficial de los silos y ductos es menor o igual que la temperatura del punto de rocío. A una temperatura mínima empleada en el proceso, la condensación tiene lugar en zonas como el separador de grumos, la entrada del ciclón de formación, y el silo de fibra. Mientras que, a una temperatura máxima empleada, la condensación ocurre en la entrada del ciclón de formación y en el silo de fibra.

Referente a las posibles alternativas de mejora frente al fenómeno de condensación en el área manejo de fibra, se evaluó:

- La utilización de distintos recubrimientos: manta elastomérica, poliestireno y poliuretano expandido a diferentes espesores, sin embargo, estos no presentan mayor influencia en términos de la problemática.

- Para alejarse de la condición de saturación del sistema, se debe aumentar la temperatura del aire utilizado como transporte neumático mediante el empleo de un intercambiador de calor, de este modo, se logrará disminuir la humedad relativa al interior de los silos y ductos del proceso.

7.2 Recomendaciones

A modo de recomendación, se sugiere:

- Habilitar el intercambiador de calor que esta fuera de servicio empleando aceite térmico, con el objetivo de climatizar la temperatura del transporte neumático utilizado en el proceso.
- Instalar un medidor de humedad relativa al interior del silo de fibra, de esta manera, se podría tener conocimiento del estado de saturación del sistema.
- Generar un control automatizado sobre la temperatura a la que debe ingresar el aire hacía los silos y ductos, manipulando el flujo de aceite térmico empleado.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Albin, A., & Jaramillo, L. (1980). Observaciones sobre la variación del contenido de humedad en madera industrial astillable de *Pinus radiata*. Recuperado: 16 de abril de 2019. Disponible en: <http://mingaonline.uach.cl/pdf/bosque/v3n2/art05.pdf>

Baque, A. (13 de Noviembre de 2013). Carta Psicrométrica. Recuperado: 1 de Junio de 2019. Disponible en: <https://bit.ly/2oU5dfR>

Berg, C. (2016). Boletín técnico: Psicometría y la carta psicrométrica. Recuperado: 4 de Junio de 2019. Disponible en: <https://bit.ly/2tou5z0>

Bilurbina Alter, L., Liesa Mestres, F., & Iribarren, J. I. (Octubre, 2013). Corrosión y protección. Recuperado: 10 de Abril de 2019. Disponible en: <https://bit.ly/2YyLAJp>

Cai, Zhiyong; Muehl, James H.; Winandy, Jerrold E. (2006). Effects of panel density and mat moisture content on processing medium density fiberboard. Forest products journal. Vol. 56, no. 10: páginas 20-25. Recuperado: 17 de abril de 2019

Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2007). Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones / Yunus A. Çengel y Afshin J. Ghajar (3a. ed., 46 pp.). México D.F.: McGraw Hill. Recuperado el 5 de Junio 2019

Dávila P., J., & Martines L., E. (19 al 23 de Septiembre de 2016). Centro Nacional de Metrología. Análisis de la conversión de humedad relativa a temperatura de punto de rocío. México. Recuperado el 22 de Mayo 2019. Disponible en: <https://bit.ly/2PYUH27>

Duque Coronel, A. (Septiembre de 2016). *Universidad Politécnica Madrid*. Obtenido de Estudio del efecto de las condiciones atmosféricas sobre las prestaciones de una turbina de gas. Recuperado el 22 de mayo 2019. Disponible en: <https://bit.ly/2LUvqln>

Estévez Bolívar, P. A. (21 de mayo de 2012). Tesis doctoral. *Desarrollo, caracterización y optimización de resinas base urea-formol (UF), como adhesivos para tableros aglomerados con baja emisión de formaldehído*. Burgos, España. Recuperado el: 23 de abril de 2019.

Feliú Jarpa, F. (19 de Noviembre de 2012). *Casiopea*. Obtenido de Análisis tipo de madera. Recuperado: 3 de junio de 2019. Disponible en: <https://bit.ly/2MJs8nG>

Flores Vázquez, D. L. (2017). *Universidad Autónoma del Estado de México*. Obtenido de Fenómenos de transporte. Recuperado 18 de junio de 2019. Disponible en: <https://bit.ly/2YAzDCY>

Fonseca Diaz, N., Niño Serna, C., & Gutiérrez, M. (2009). Estudio del proceso de acondicionamiento de aire mediante sales disecantes en aplicaciones HVAC/R. *Scientia et Technica* año XV, 6. Recuperado el: 8 de Julio de 2019. Disponible en: <https://bit.ly/2SWVDH9>

García, L.E., Guindeo, A.C., Peraza, C.O. (2002). *La madera y su tecnología*. Madrid: Mundi-Prensa (2002 ed.). Recuperado el: 2 de Abril de 2019.

González, A. F. (1993). Evolución del mundo tecnológico de los tableros de madera. En Lourizán, *Congreso Forestal Español*. Recuperado el: 8 de abril de 2019.

Gorrini, B., Poblete, H., Hernandez , G., & Dunn, F. (19 de Agosto de 2003). *Tableros de partículas y MDF de Eucalyptus nitens: Ensayos a escala industrial*. Obtenido de Revistas Electrónicas UACH, Recuperado el 18 de abril de 2019. Disponible en: <https://bit.ly/2Yhmn14>

Kahan, S. (2004). Obtenido de Módulo: Aire Húmedo. Recuperado: 8 de Julio de 2019. Disponible en: https://www.fing.edu.uy/if/cursos/fister/modulos/Aire_Hum/apuntes.pdf

Keil, G., & Spavento, E. (Marzo de 2009). *Industria de tableros de Fibras de Madera. Industrias Forestales*. Recuperado: 18 de Mayo de 2019. Disponible en: <https://bit.ly/2LUdFcm>

Lin, R., Bhattacharyya, D., & Van Houts, J. (Enero de 2006). Machinability Investigation of Medium – Density Fibreboard. Recuperado: 23 de Abril de 2019. Disponible en: <https://bit.ly/319Va7w>

Márquez Rubio, D. (2016). *Mecanismos de condensación de vapor de agua*. Recuperado: 22 de Mayo de 2019. Disponible en: <https://docplayer.es/4718978-Tema-5-mecanismos-de-condensacion-precipitacion.html>

Martín Domingo, A. (8 de Mayo de 2018). *Apuntes de transmisión del calor*. Recuperado: 1 de Julio de 2019. Disponible en: <http://oa.upm.es/50949/1/amd-apuntes-transmision-calor-v2.8.pdf>

Masisa S.A. (Mayo de 2015). *Masisa*. Recuperado en Abril de 2019. Disponible en: <https://bit.ly/2LT8auE>

Mobil. (Agosto de 2018). *Mobiltherm 600 series*. Recuperado: 23 de Julio de 2019. Disponible en: <https://www.mobil.com/Spanish-MX/Industrial/pds/GLXXMobiltherm-600-Series>

Nicewicz, D., & Monder, S. (2014). The influence of moisture of fiber mats on the properties of MDF boards. Varsovia, Polonia. Recuperado: 27 de Mayo de 2019. Disponible en: <https://bit.ly/2YbtqSG>

Obando, M. (2014). *Academia*. Obtenido de capítulo n°1. Propiedades del aire húmedo y procesos con aire húmedo (psicrometría). Recuperado: 2 de Junio de 2019. Disponible en: <https://bit.ly/2LUelci>

Pang, S. (06 de Febrero de 2000). *Researchgate*. Obtenido de Improving MDF fibre drying operation by application of a mathematical model. Recuperado: 24 de Abril de 2019. Disponible en: <https://bit.ly/2OuFHxh>

Perry, R., Green, D., & Maloney, J. (1934). *Manual del Ingeniero Químico*. Quinta edición. Mc Graw-Hill, México, Tomo 3, sección 11. Recuperado: 11 de Julio de 2019.

Pizzi, A. (2015). Progress in Adhesion and Adhesives. *Synthetic Adhesives for wood panels: Chemistry and Technology*. Jeddah, Saudi Arabia: Scrivener Publishing LLC. Recuperado: 16 de Mayo de 2015. Disponible en: <https://bit.ly/2yqBpft>

Reis, P. (Marzo de 2008). Optimización del proceso de secado y el transporte de fibra. *Proyecto de desenvolvimiento en el ambiente empresarial*. Portugal, Brasil. Recuperado: 24 de Abril de 2019. Disponible en: <https://bit.ly/2YsRbFI>

Spark, W. (2017). *Weather Spark*. Obtenido de El clima promedio en Cabrero. Recuperado: 16 de Abril de 2019. Disponible en: <https://bit.ly/2YxqhYI>

TLV. (2019). *Compañía especialista de vapor*. Recuperado: 15 de Julio de 2019. Disponible en: <https://www.tlv.com/global/LA/calculator/humid-air-table.html>

Velázquez, R. (28 de Marzo de 2019). *Ecología hoy: ¿Qué es la condensación? Causas, proceso, tipos y ejemplos de condensación comunes*. Recuperado: 23 de Junio de 2019. Disponible en: <https://www.ecologiahoy.com/condensacion>

Welty, J., Wicks, C. & Wilson, R. (1994). Fundamentos de transferencia de momento, calor y masa. Limusa, noriega editores. Recuperado: 12 de Julio de 2019. Disponible en: <https://bit.ly/2OtzGAQ>

ANEXOS

Anexo 1

Carta psicrométrica, a temperaturas normales (Baque, 2013).

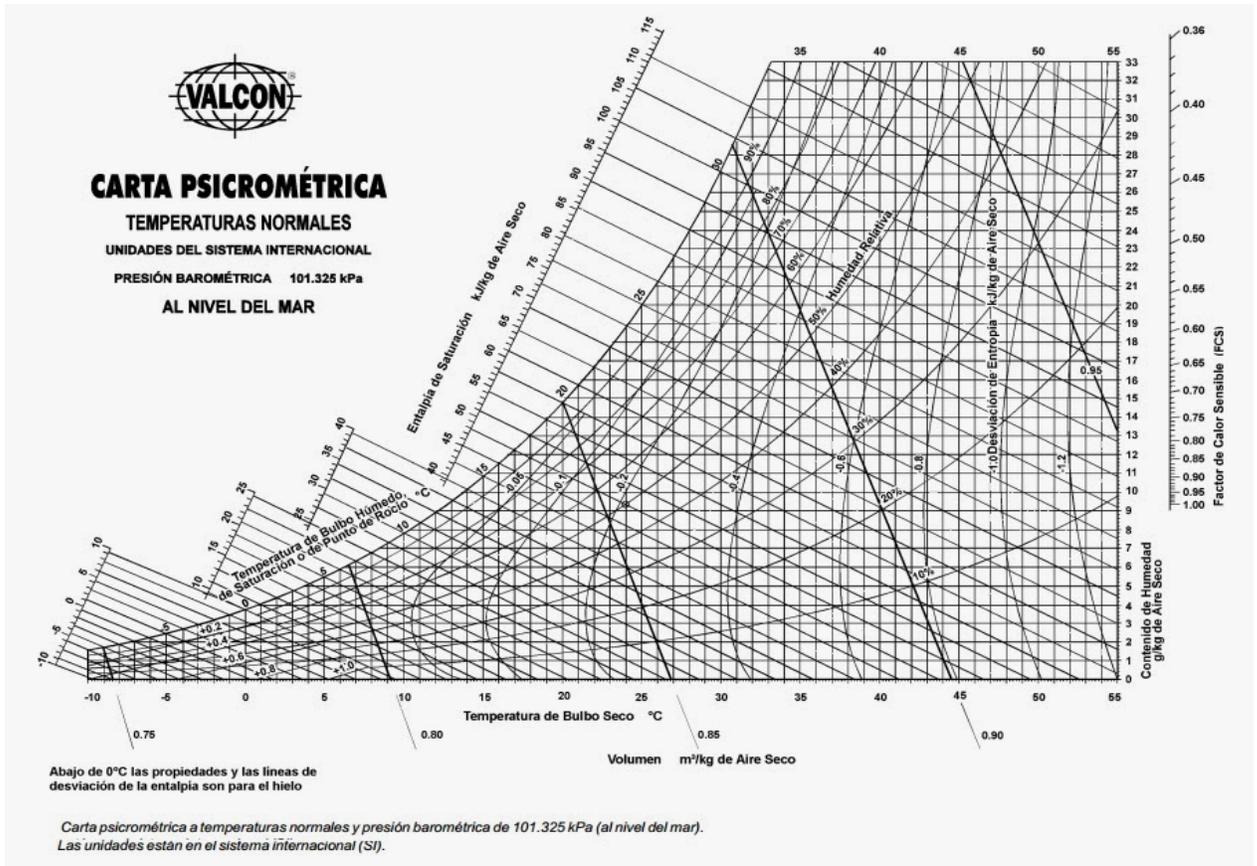


Figura A1. Carta psicrométrica.

Anexo 2

Dispositivos HOBO modelo: UX 100-014M, UX 100-011

- a) Características del registrador de temperatura ambiente y humedad relativa, visualizar Tabla A1.

Tabla A1. Características del registrador HOBO UX100-011.

Características	HOBO UX100-011
Rango de medición	20 a 70°C, 0 a 95% HR
Precisión	0,21°C, ± 2,5%
Dimensiones	37 x 85 x 23 mm
Cantidad de valores almacenados	84.650

- b) Características del registrador de temperatura interior, visualizar Tabla A2.

Tabla A2. Características del registrador HOBO UX100-014M.

Características	HOBO UX100-014M
Rango de medición	-20 a 70°C, 0 a 95% HR
Precisión	0° a 50°C
Dimensiones	36,6 x 59,4 x 15,2 mm
Cantidad de valores almacenados	208.076

Anexo 3

Memoria de cálculo de temperatura superficial en silos y ductos:

1) Estimación de resistencias térmicas de los materiales de los ductos.

$$R_{material} = \frac{\Delta x}{k * A} \quad \text{ecuación (A1)}$$

Donde Δx es el espesor de dicho material empleado, k es la conductividad térmica del material en W/mK, A es el área de la sección transversal de transferencia de calor en m^2 .

Se consideró un área de la sección transversal para el separador de grumos de 12 m^2 , para la entrada del ciclón de formación 34,71 m^2 y para el silo de fibra 11,94 m^2 . En la Tabla A3 se visualiza las características de los materiales de recubrimiento y materiales de los ductos.

Tabla A3. Espesores y conductividades térmicas, según distintos tipos de materiales tanto de fabricación como para recubrimiento.

Material	Espesor (mm)	k (W/mK)
Acero al carbono	5	63,90
Manta elastomérica	45	0,034
Poliestireno expandido	40 / 80	0,038
Poliuretano expandido	40 / 80	0,026
Lana mineral	35	0,035
Plancha de zinc	5	0,210

Por ejemplo, el silo de fibra está compuesto de una pared de acero al carbono junto con un recubrimiento de manta elastomérica, calculando la resistencia térmica de los materiales, ver Tabla A4.

Tabla A4. Resistencia térmica de los materiales en el silo de fibra.

Material	Resistencia térmica (K/W)
Acero al carbono	0,00000656
Manta elastomérica	0,11

2) Cálculo de la resistencia térmica por convección interior y exterior.

Se supone un coeficiente convección interior igual a 28 W/m²K, considerando que el interior del silo de fibra emplea el uso de ventilador, por tanto el mecanismo de transferencia de calor implica convección forzada. El coeficiente de convección exterior para las corrientes de aire atmosférico es aproximadamente 5,5 W/m²K (Welty, Wicks, & Wilson, 2019).

Así mediante la ecuación (A2) se calculó la resistencia térmica de convección interior y exterior.

$$R_{h,i} = \frac{1}{A * h_i} \quad \text{ecuación (A2)}$$

En consecuencia, el coeficiente de convección interior y exterior en el silo de fibra es de 0,0030 y 0,015 K/W, respectivamente.

La resistencia térmica total (R_T) es la sumatoria de todas las resistencias que implicadas en el fenómeno de transferencia de calor. De este modo, R_T para el silo de fibra es de 0,13 K/W.

3) Considerando una temperatura interior del silo de fibra de 28,8 °C y una temperatura exterior de 0,7 °C. El calor transferido (q) en el sistema de pared compuesta, se calcula de la siguiente forma, ver ecuación (A3):

$$q = \frac{T_{interior} - T_{exterior}}{R_T} \quad \text{ecuación (A3)}$$

Reemplazando los datos del sistema, el calor transferido desde el interior hacia el exterior del silo de fibra es de 221,74 W.

4) Cálculo de temperatura superficial. Reemplazando en la ecuación (A4) se obtiene la T_s °C.

$$T_{amb.} - T_s = \frac{R_{h,i}}{R_T} (T_{interna} - T_{amb.}) \quad \text{ecuación (A4)}$$

Despejando T_s , se obtiene la temperatura superficial, siguiendo con el ejemplo y considerando una temperatura interna de $28,8\text{ °C}$, una temperatura ambiente de $0,7\text{ °C}$, la temperatura superficial es de $28,14\text{ °C}$, comparando este valor con el punto de rocío $28,16\text{ °C}$, en consecuencia hay condensación en el sistema.

Para los otros puntos calculados se emplea la misma metodología, teniendo en cuenta que los ductos de separador de grumos y de la entrada del ciclón de formación, están compuestas por acero al carbono, lana mineral, y una plancha de zinc.

En el caso del estudio del aislamiento térmico del silo de fibra, a la resistencia térmica total se le debe sumar la resistencia térmica del material a agregar, y luego emplear la misma metodología.

Anexo 4

- Memoria de cálculo del balance de masa y energía en el intercambiador de calor.

En primera instancia se debe considerar que el flujo de aire de entrada será igual al flujo de la corriente de salida.

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_{aire} = 8,8875 \left(\frac{kg}{s} \right)$$

Se debe calcular el calor necesario para incrementar la temperatura del sistema desde 0,7 °C a 39,8 °C, siendo el calor específico del aire a condiciones normales igual a 1,00 (kJ/kgK), por lo que reemplazando en la ecuación (10) presente el informe, se tiene:

$$\dot{Q} = \dot{m} * C_p * \Delta T = 8,8875 \frac{kg}{s} * 1,00 \frac{kJ}{kgK} * (312,95 - 273,85)K = 347,50 \left(\frac{kJ}{s} \right)$$

Considerando las variables empleadas en el intercambiador de calor con respecto al diagrama empleado en la Figura 6 de este informe, es posible determinar la entalpía para cada corriente, ver Tabla A5.

Tabla A5. Variables empleadas en el cálculo del balance de masa y energía.

Fluido	Temperatura (°C)	Calor específico (kJ/kgK)	Entalpía (kJ/kg) $\hat{H} = \int C_p dT$
Aire atmosférico (fluido frío)	T ₁ = 0,70	1,00	$\hat{H}_2 - \hat{H}_1 = 39,37$
	T ₂ = 39,8		
Aceite térmico (fluido caliente)	T ₃ = 260	2,74	$\hat{H}_4 - \hat{H}_3 = -27,4$
	T ₄ = 250		

Mediante el cálculo de entalpía y considerando el balance energético desarrollado en la sección 5.2.3 del presente informe, se tiene:

$$\dot{m}_{A.T.} = \frac{\dot{Q} - \dot{m}_{aire} * (\hat{H}_1 - \hat{H}_2)}{\hat{H}_4 - \hat{H}_3} = \frac{347,50 \left(\frac{kJ}{s}\right) - 8,8875 \left(\frac{kg}{s}\right) * 39,37 \left(\frac{kJ}{kg}\right)}{-27,4 \left(\frac{kJ}{kg}\right)}$$

$$\dot{m}_{A.T.} = 0,087 \left(\frac{kg}{s}\right)$$

Para obtener el caudal de aceite térmico necesario para incrementar la temperatura en los ductos del proceso, se divide el flujo másico obtenido por la densidad del aceite térmico, 800 kg/m³ (Mobil, 2018), se tiene:

$$\dot{Q} = \frac{\dot{m}_{A.T.}}{\rho_{A.T.}} = \frac{0,087 \left(\frac{kg}{s}\right)}{800 \left(\frac{kg}{m^3}\right)} = 1,1 * 10^{-4} \left(\frac{m^3}{s}\right) = 0,39 \left(\frac{m^3}{h}\right)$$