



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**TRABAJO EXPERIMENTAL PREVIA A LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

TEMA:

"ANÁLISIS TÉRMICO PARA EL PROCESO DE SECADO DE MADERA LAMINADA DE HASTA 5 MM DE ESPESOR EN LA EMPRESA ARBORIENTE S.A EN LA CIUDAD DE PUYO, PARA DETERMINAR SU EFICIENCIA."

AUTOR: Hernández Cuenca Walter Wladimir

TUTOR: Ing. Mg. Santiago Cabrera

AMBATO - ECUADOR

2017

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

En calidad de tutor del trabajo experimental, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico, con el tema: “ANÁLISIS TÉRMICO PARA EL PROCESO DE SECADO DE MADERA LAMINADA DE HASTA 5 MM DE ESPESOR EN LA EMPRESA ARBORIENTE S.A EN LA CIUDAD DE PUYO, PARA DETERMINAR SU EFICIENCIA”. Elaborado por el señor Walter Wladimir Hernández Cuenca, estudiante de la facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.

Certifico:

Que la presente tesis es original de su autor.

Ha sido revisado cada uno de sus capítulos.

Es concluida y puede continuar con el trámite correspondiente.

Ambato, septiembre de 2017

Ing. Mg. Santiago Cabrera

AUTORÍA DE TRABAJO

Declaro que el contenido del trabajo experimental: “ANÁLISIS TÉRMICO PARA EL PROCESO DE SECADO DE MADERA LAMINADA DE HASTA 5 MM DE ESPESOR EN LA EMPRESA ARBORIENTE S.A EN LA CIUDAD DE PUYO, PARA DETERMINAR SU EFICIENCIA”, así como sus ideas, opiniones, resultados, conclusiones, son auténticos y de responsabilidad exclusiva de mi persona en calidad de autor del proyecto.

Ambato, septiembre de 2017

Hernández Cuenca Walter Wladimir
C.I 160038187-3

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este proyecto experimental o parte de él, un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos en línea patrimoniales de mi proyecto experimental con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este documento dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Ambato, septiembre de 2017

Hernández Cuenca Walter Wladimir
C.I 160038187-3

Dedicatoria

A Dios, por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A mi familia quienes por ellos soy lo que soy.

A mi madre Rosa, por ser el pilar más importante y por demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional.

A mi padre José, por los ejemplos de perseverancia, constancia y disciplina que lo caracterizan.

A mi hermana Carmen, por ser el ejemplo de una hermana mayor y por brindarme siempre su apoyo incondicional.

Agradecimiento

Primeramente, agradezco a Dios por brindarme la oportunidad de culminar una etapa más en mi vida. A la Universidad Técnica de Ambato por haberme aceptado a ser parte de ella y abierto sus puertas de su seno científico para poder estudiar mi carrera, así como también a los diferentes docentes que me brindaron sus conocimientos para seguir adelante día a día.

Agradezco también a mi tutor de Tesis el Ing. Mg. Santiago Cabrera por haberme brindado la oportunidad de recurrir a su capacidad y conocimiento científico, así como también por haberme tenido toda la paciencia del mundo para guiarme durante el desarrollo de la tesis.

Mi agradecimiento también va dirigido al Gerente de Planta y Forestal de la Empresa Arboriente S.A. el Ing. Marcos Gutiérrez por haber aceptado que realice mi Tesis en su prestigiosa empresa.

Al Tlgo. Edwin Tipanta Jefe de mantenimiento de Arboriente S.A. por la ayuda brindada. Un agradecimiento a mi familia en especial a mi madre Rosa Cuenca por su esfuerzo, apoyo incondicional y ayuda desinteresada.

Le estaré agradecido toda la vida. Finalmente agradezco a todos mis compañeros por tantas experiencias vividas.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

PÁGINAS PRELIMINARES

Certificación del Tutor.....	II
Autoría de Trabajo.....	III
Derechos de autor.....	IV
Dedicatoria.....	V
Agradecimiento.....	VI
Índice de Contenidos.....	VII
Índice de Figuras.....	IX
Índice de Tablas.....	X

RESUMEN EJECUTIVO.....	XII
-------------------------------	------------

CAPÍTULO 1: EL PROBLEMA.....	1
-------------------------------------	----------

1.1 Tema.....	1
1.2 Antecedentes.....	1
1.3 Justificación.....	2
1.4 Objetivos.....	3
1.4.1 Objetivo General.....	3
1.4.2 Objetivos Específicos.....	3

CAPÍTULO 2: FUNDAMENTACIÓN.....	4
--	----------

2.1 Fundamentación teórica.....	4
2.1.1 Madera.....	4
2.1.2 Madera aserrada.....	4
2.1.3 Madera seca.....	4
2.1.4 La humedad en la madera.....	5
2.1.5 Proceso de secado de la madera.....	5
2.1.6 Importancia del secado de la madera.....	5
2.1.7 Secado natural.....	6
2.1.8 Secado artificial.....	7

2.1.8.1 Cámaras convencionales.....	8
2.1.8.2 Secado por Radio frecuencia.....	9
2.1.8.3 Cámaras de Vacío.....	9
2.1.8.4 Cámaras de Radiación Solar.....	9
2.1.8.5 Cámaras Deshumificadores.....	10
2.1.8.6 Secado por inmersión.....	10
2.1.8.7 Secado mixto.....	11
2.1.8.8 Secado por bomba de calor.....	11
2.1.9 Intercambiadores de calor.....	11
2.1.9.1 Intercambiador de calor de tubo doble.....	12
2.1.9.2 Intercambiador de calor de casco y tubos.....	13
2.1.9.3 Intercambiador de calor de placas y armazón.....	13
2.1.10 Transferencia de calor.....	14
2.1.10.1 Transferencia de calor por conducción.....	14
2.1.10.2 Transferencia de calor por convección.....	15
2.1.10.3 Convección natural.....	16
2.1.10.4 Radiación.....	17
2.1.11 Balance de energía.....	18
2.1.11.1 Balance de energía en sistemas cerrados.....	18
2.1.11.2 Balance de energía en sistemas abiertos en estado estacionario.....	20
2.1.12 Eficiencia en el intercambiador de calor.....	20
2.2 Hipótesis.....	20
2.3 Señalamiento de variables de la hipótesis.....	20
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA.....	21
3.1 Nivel o tipo de investigación.....	21
3.2 Población y muestra.....	21
3.3 Operacionalización de variables.....	22
3.3.1 Variable independiente.....	22
3.3.2 Variable dependiente.....	23
3.4 Plan de recolección de información.....	24
3.5 Plan de procesamiento y análisis.....	25

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	26
4.1 Recolección de datos.....	26
4.1.1 Parámetros de operación.....	26
4.1.2 Componentes principales de la cámara de secado.....	27
4.1.3 Temperatura de elementos constitutivos de la cámara.....	28
4.1.4 Temperatura paredes.....	28
4.1.5 Análisis de convección natural.....	30
4.1.6 Propiedades del aire.....	31
4.1.7 Cálculo de parámetros térmicos.....	32
4.1.8 Calor perdido por convección natural.....	35
4.1.9 Análisis de convección forzada.....	36
4.1.10 Análisis de pérdidas de calor por conducción.....	38
4.1.11 Análisis de pérdidas de calor por radiación.....	40
4.1.12 Análisis de calor consumido por la madera.....	41
4.1.13 Flujo de calor total consumido.....	42
4.1.14 Análisis de vapor suministrado.....	43
4.1.15 Otras pérdidas no evaluadas.....	44
4.1.16 Cálculo de la eficiencia.....	44
4.2 Análisis de resultados.....	44
4.3 Verificación de hipótesis.....	47
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	50
5.1 Conclusiones.....	50
5.2 Recomendaciones.....	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Medidor de humedad.....	5
Figura 2-2. Secado natural de la madera.....	7
Figura 2-3. Secado artificial de la madera.....	7
Figura 2-4. Horno Convencional de secado de madera.....	8
Figura 2-5. Horno de Vacío de secado de madera.....	9
Figura 2-6. Horno Solar de secado de madera.....	10

Figura 2-7. Horno Deshumidificador de secado de madera.....	10
Figura 2-8. Secador por bomba de calor.....	11
Figura 2-9. Intercambiador de calor de tubo doble.....	12
Figura 2-10. Flujo paralelo y contraflujo.....	12
Figura 2.11 Intercambiador de calor de casco y tubos.....	13
Figura 2.12 Intercambiador de calor de placas y armazón.....	14
Figura 2.13 Transferencia de calor por conducción.....	14
Figura 2-14. Transferencia de calor por convección.....	16
Figura 4-1. Secador continuo de láminas.....	26
Figura 4-2. Cámara No. 4 secador continuo.....	29
Figura 4-3. Toma de temperaturas Compuerta fija.....	29
Figura 4-4. Diagrama de Sankey de pérdidas de calor.....	46
Figura 4-5. Eficiencia en función del flujo másico de madera.....	48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Cuadro comparativo de los tipos de secado.....	8
Tabla 3-1. Elementos de estudio.....	21
Tabla 3-2. Plan de recolección de información.....	24
Tabla 3-3. Plan de procesamiento de información.....	25
Tabla 4-1. Hoja de registro de datos secador continuo.....	27
Tabla 4-2. Elementos y materiales constitutivos de la cámara de secado.....	27
Tabla 4-3. Temperatura inicial componentes.....	28
Tabla 4-4. Temperatura de operación componentes.....	28
Tabla 4-5. Datos temperatura externa pared.....	29
Tabla 4-6 Temperatura promedio pared externa.....	30
Tabla 4-7. Temperatura interna pared.....	30
Tabla 4-8. Temperatura ambiente y de superficie.....	31
Tabla 4-9. Temperatura de película.....	31
Tabla 4-10. Propiedades del aire.....	32
Tabla 4-11. Coeficiente volumétrico de expansión térmica.....	33
Tabla 4-12. Número de Grashof.....	33

Tabla 4-13. Número de Rayleigh.....	34
Tabla 4-14. Número de Nusselt.....	34
Tabla 4-15. Coeficiente de convección.....	35
Tabla 4-16. Calor perdido por convección natural.....	36
Tabla 4-17. Características Ventilador.....	36
Tabla 4-18. Propiedades térmicas del aire.....	37
Tabla 4-19. Masa de los componentes.....	39
Tabla 4-20. Calor disipado por los componentes.....	39
Tabla 4-21. Pérdidas de calor por radiación.....	41
Tabla 4-22. Propiedades y parámetros de la madera.....	41
Tabla 4-23. Flujo de vapor suministrado.....	43
Tabla 4-24. Entalpía del vapor suministrado.....	43
Tabla 4-25. Resumen de valores porcentuales de flujo de calor.....	45
Tabla 4-26. Propiedades y parámetros de la madera-capacidad máxima.....	47

ANEXOS

ANEXO A. Producción mensual de láminas – octubre 2016.....	55
ANEXO B. Producción mensual de láminas – noviembre 2016.....	56
ANEXO C. Producción mensual de láminas – diciembre 2016.....	57
ANEXO D. Promedio producción por hora de operación.....	58
ANEXO E. Secador continuo Empresa Arboriente.....	59
ANEXO F. Caldero suministrador de vapor.....	60
ANEXO G. Ventilador – parte superior cámara de secado.....	61
ANEXO H. Medición de Temperaturas.....	62
ANEXO I. Medición de la humedad de la madera.....	63
ANEXO J. Propiedades del aire a presión atmosférica.....	64
ANEXO K. Catálogo termómetro infrarrojo.....	65
PLANOS.....	68

RESUMEN EJECUTIVO

Una vez estabilizadas las condiciones de operación se efectuó la toma de datos y mediciones necesarias especialmente de temperatura, componentes principales de las cámaras del secador continuo, temperatura ambiente promedio; se modeló los componentes y la estructura del secador con la finalidad de obtener la masa de cada una de ellas, parámetros fundamentales para el cálculo de pérdidas de calor. Una vez determinadas las propiedades termodinámicas y físicas de los componentes, se desarrolló el cálculo de pérdidas de calor por conducción, convección y radiación. En función del flujo másico de vapor se obtuvo que el calor suministrado al secador tiene una magnitud de 474.46 KW. La eficiencia del proceso se obtuvo como el cociente entre el calor consumido por la madera procesada 257.82 KW y el flujo de calor suministrado por el caldero 474.46 KW, obteniendo un valor de 54.34%.

Abstract: Once the operating conditions were stabilized, the necessary data and measurements were made, namely temperature, main components of the continuous dryer chambers, average ambient temperature; the components and the structure of the dryer were modeled in order to obtain the mass of each of them, fundamental parameters for the calculation of heat losses. Once the thermodynamic and physical properties of the components were determined, the calculation of heat losses by conduction, convection and radiation was developed. Depending on the mass flow of steam, it was obtained that the heat supplied to the dryer has a magnitude of 474.46 KW. The efficiency of the process was obtained as the quotient between the heat consumed by the processed wood 257.82 KW and the heat flow supplied by the cauldron 474.46 KW, obtaining a value of 54.34%.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

1.1 Tema

“ANÁLISIS TÉRMICO PARA EL PROCESO DE SECADO DE MADERA LAMINADA DE HASTA 5 MM DE ESPESOR EN LA EMPRESA ARBORIENTE S.A EN LA CIUDAD DE PUYO, PARA DETERMINAR SU EFICIENCIA”.

1.2 Antecedentes

Ecuador tiene gran potencial productivo en el sector forestal, por ende, existe la necesidad de implementar tecnologías que aceleren los procesos de producción y brinden las condiciones adecuadas para ello.

Con este antecedente, la investigación se convierte en vital, refiriéndonos a condiciones adecuadas de procesamiento.

El señor Sebastián Andrés Doerner Hitschfeld, en su estudio desarrollado en Chile, en el año 2009, bajo el tema “PROYECTO CÁMARA DE SECADO PARA MADERA ELABORADA”, estableció que debido a los diferentes usos que presenta la madera, es necesario que esta se encuentre a un contenido de humedad muy por debajo del cual fue obtenida. Uno de los métodos más usados para alcanzar un contenido de humedad por debajo de un 15%, es el secado en cámara o en horno.

En Lima-Perú, en el año 2006, el señor Juan Timoteo Sedano Flores, en su tesis cuyo tema es “DISEÑO DE UN HORNO TIPO BACH PARA SECAR MADERA”, determinó que la eficiencia de esta máquina térmica es 36 %. La causa

principal es el calentamiento inicial, en especial de la propia madera húmeda. El aislamiento térmico mejora el rendimiento del horno, pero no es la causa principal de la baja eficiencia.

El señor Matías Ignacio Jiménez Rivas, en el año 2015 realizó un proyecto bajo el tema: “DISEÑO DE SECADORES CONVECTIVOS ZONALES PARA PROCESAMIENTO DE PALETAS Y PRODUCTOS DE ÁLAMO”, donde concluyó que las cámaras de secado bajo estudio pueden mejorar ostensiblemente su desempeño al reconfigurarse. La alimentación de aire; debe ser como mínimo a 15 m/s para alcanzar una buena distribución de aire y promover un secado uniforme.

1.3 Justificación

Arboriente es una sociedad anónima legalmente constituida, dedicada a la producción de tableros contrachapados de madera, más conocidos como triplex. Su planta industrial se encuentra ubicada en la ciudad de Puyo, Provincia de Pastaza, y sus oficinas administrativas y de comercialización están en Ambato. La empresa se encuentra afiliada a la Cámara de Industrias de Tungurahua desde el año de 1979 en que inicia sus actividades.

Este proyecto se desarrolla por la necesidad de la empresa “ARBORIENTE S.A” en vista que no cuentan con los datos necesarios de los parámetros termo físicos para el proceso de secado de láminas de madera torneadas de 1 a 5 mm de espesor.

En la actualidad los procesos de secado de la madera son de vital importancia dentro del sector maderero; con un efectivo proceso de secado se puede obtener un aprovechamiento del ciento por ciento de la materia prima, además, se garantiza productos terminados de alta calidad y durabilidad.

El secado es uno de los procesos más exigentes en la preparación de la madera para uso industrial y doméstico, de hecho, de su correcto desarrollo depende que este material ofrezca los requerimientos de estabilidad dimensional, cualidades de trabajabilidad y propiedades mecánicas exigidas para las maderas a procesar que

son fundamentales para la calidad final de los productos. Para alcanzar la condición antes mencionada, la madera debe someterse al proceso de secado artificial. El sistema clásico de secado de madera consiste de una serie de equipos entre los cuales se puede mencionar: quemador, ventilador, humidificadores, compuertas de aireación y cámara de secado; que deben operar bajo ciertas condiciones que garanticen la cantidad de humedad solicitada de la madera de uso industrial.

El estudio se desarrolló de acuerdo a lo planificado y resultó factible técnica y económicamente debido a que se poseen los conocimientos necesarios para manejar las variables y parámetros de funcionamiento, operación y medición, además se contó con los recursos económicos necesarios y apoyo de la entidad beneficiaria del proyecto.

El beneficiario directo del proyecto a desarrollar es la Empresa Arboriente S.A. que contará con un estudio técnicamente desarrollado para su posterior aplicación y desarrollo productivo de la misma.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Determinar la eficiencia energética para un secador continuo con tres pistas de rodillos de capacidad $25 \text{ m}^3/\text{dia}$, mediante un análisis térmico en la Empresa Arboriente S.A. en la ciudad de Puyo.

1.4.2 Objetivos específicos

- Establecer los parámetros termo físicos para el proceso de secado.
- Estimar los rangos de producción.
- Analizar la transferencia de calor por convección al interior del secador.
- Calcular la eficiencia energética en una cámara de secado tipo.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTACIÓN

2.1 Fundamentación teórica

2.1.1 Madera

Se denomina madera a aquella parte más sólida y fibrosa de los árboles que se ubica debajo de su corteza y puede proceder de diferentes zonas vegetativas de las plantas en dependencia de la naturaleza de ésta como son: raíces, tallos y ramas. La madera en la actualidad es uno de los materiales más utilizados en la industria por su facilidad de maquinado y propiedades físicas y mecánicas apropiadas para una gran variedad de aplicaciones [1].

2.1.2 Madera aserrada

Piezas de madera maciza obtenida por aserrado del árbol, generalmente son cuadradas, es decir con caras paralelas entre sí y cantos perpendiculares a las mismas. La madera aserrada presenta una humedad alta, por lo que es necesario un proceso de secado posterior [2].

2.1.3 Madera seca

Su grado de humedad está en equilibrio con la humedad relativa del aire y se le considera como tal, cuando tiene un contenido de humedad inferior al 20% y para lograr esto existen dos procesos, el secado al aire y el secado al horno, cada uno de ellos con sus ventajas y desventajas; en el primer caso el tiempo necesario para terminar el proceso es demasiado prolongado en comparación con el segundo [3].

2.1.4 Humedad en la madera

Incluso en ambientes muy secos la madera es capaz de alcanzar una humedad relativa del 5%. La humedad es absorbida por la madera en forma de vapor de agua. Se calcula que con un porcentaje del 30% está saturada de humedad. Aunque se le aporte más agua, ya no se hincha más [4].



Figura 2-1. Medidor de humedad [12].

2.1.5 Proceso de secado de la madera

El secado de la madera consiste en obtener un contenido de humedad que presente un equilibrio con las características atmosféricas donde será utilizada, con la menor cantidad de degradación posible, para la mayoría de aplicaciones es importante reducir su humedad antes de su transformación en productos, para evitar efectos no deseables [1].

Las industrias de la madera se abastecen de madera en estado húmedo, por lo que deben contar con equipos que permitan secarla con un control en cuanto a su contenido de humedad.

2.1.6 Importancia del secado de la madera

Las ventajas que presenta el secado de la madera son estabilidad dimensional, mejoramiento de propiedades mecánicas a excepción del impacto, economía en el transporte, resistencia al ataque de hongos e insectos, mejores terminados, manejable industrialmente, entre otras [2].

A continuación, se detallan algunas de ellas:

- **Peso de la madera:** después de realizar el secado, se elimina gran parte de la humedad, lo que representa una disminución en el peso que varía desde un 25% hasta un 50% con respecto a su peso inicial, lo cual permite minimizar costos de transporte y mayor facilidad de manipulación para el levantamiento de estructuras.
- **Estabilidad dimensional:** cuando el proceso de secado se ha desarrollado correctamente y es aproximadamente contenido de humedad de equilibrio en servicio, no presentará cambios apreciables en sus dimensiones y forma.
- **Resistencia mecánica:** una vez que el agua libre haya sido eliminada, es decir debajo del punto de saturación de las fibras, la madera aumenta considerablemente su resistencia mecánica; la madera con un contenido menor o igual al 10%, tendrá una resistencia de aproximadamente un 33% mayor que la madera verde.
- **Trabajabilidad:** la madera seca tiene mejores características para ser procesada de manera más fácil en la fabricación como aserrada, cepillada, lijada.
- **Aislante térmico:** los espacios celulares e intercelulares estarían ocupados por aire, lo cual hace que la transmisión de calor sea baja.
- **Aislante eléctrico:** mientras menor sea el contenido de humedad, su resistencia al paso de corriente eléctrica será mayor [2].

2.1.7 Secado natural

Como se mencionó con anterioridad existen dos métodos de secado, a continuación, se presentan las características más sobresalientes de cada uno de ellos.

Es el método más económico, pero menos sofisticado de todos los procesos de secado, como su nombre lo indica no necesita del uso de máquinas, pero las principales desventajas son un secado no controlado y consumo innecesario de tiempo, que en empresas de producción a gran escala no es el recomendado, debido a que involucraría pérdidas económicas considerables [1].



Figura 2-2. Secado natural de la madera [13].

2.1.8 Secado artificial

Es un método que requiere una inversión inicial mayor, por la necesidad del uso de equipo o cámaras apropiadas para esta operación, el cual es recompensado por la calidad del producto obtenido, optimizando el consumo de tiempo [1].



Figura 2-3. Secado artificial de la madera [14].

Tabla 2-1. Cuadro comparativo de los tipos de secado [15].

SECADO NATURAL	SECADO ARTIFICIAL
Requerimiento de tiempo Excesivo	Reducción del tiempo de proceso
Bajo control sobre los defectos en la madera	Minimización de defectos en la madera
Obtención del contenido de humedad variable	Obtención del contenido de humedad requerido
Requerimiento de grandes áreas de proceso	Optimización del área de trabajo
Utilizada en pequeña Producción	Utilizado en producción a gran escala

2.1.8.1 Cámaras Convencionales

Trabajan con temperatura media-alta y son las más usadas en el mundo, pues existe una gran variedad dentro del grupo, dependiendo de su configuración, aunque todas funcionan bajo un mismo principio.

Cuentan con una caldera de madera o carbón, que calienta el agua de 90° C a 100° C, para luego hacer pasar el líquido por unos intercambiadores de calor o radiadores instalados en el interior del horno, en donde también se instalan ventiladores de gran capacidad que generan una fuerte corriente de aire caliente, gracias al paso de éste por los radiadores [5].



Figura 2-4. Horno Convencional de secado de madera [16].

2.1.8.2 Secado por Radio Frecuencia

Ideales también para cargas pequeñas, éstas operan totalmente diferente a todas las anteriores gracias a que el principio de la radio frecuencia es casi exactamente como el de un horno microondas: las células con agua son obligadas a vibrar con alta frecuencia, para generar un calentamiento de las células que evapore el agua [5].

2.1.8.3 Cámaras de Vacío

Parten de un principio de funcionamiento distinto a las anteriormente citadas, y que se resume en dos pasos aplicados consecutivamente hasta alcanzar la humedad deseada: primero, se aplica temperatura a la madera “inyectándola” a presión, para abrir el poro, luego se aplica el vacío succionando la humedad. Estas cámaras que, generalmente se utilizan en cargas de madera relativamente pequeñas y tienen un alto costo en el mercado [4].



Figura 2-5. Horno de Vacío de secado de madera [17].

2.1.8.4 Cámaras de Radiación Solar

Funcionan aprovechando la energía calorífica del sol y la luz para ganar temperatura. En este grupo el mercado ofrece diversos tipos con varios grados de tecnificación y tamaños. La principal ventaja de estos sistemas es el menor consumo energético y el respeto por el medio ambiente [5].

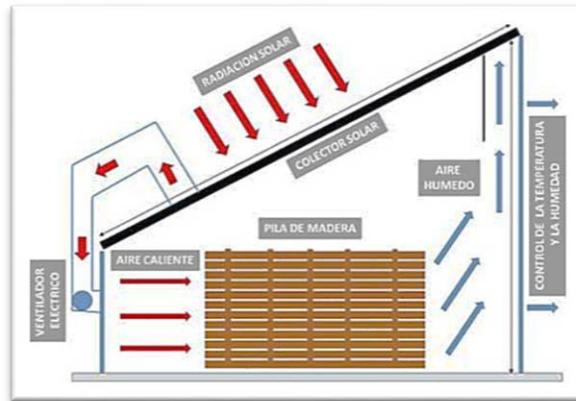


Figura 2-6. Horno Solar de secado de madera [16].

2.1.8.5 Cámaras Deshumidificadores

Estas cuentan con todos los elementos de las convencionales, pero incluyen adicionalmente unos equipos similares a los de aire acondicionado, dotados de unos serpentines por los cuales se pasa el aire para que, en vez de calentarlo, se enfríe. De esta forma se condensa la humedad que, a su vez, se elimina por conductos para ese propósito; sería algo parecido a la mezcla de “horno con nevera” [4].



Figura 2-7. Horno Deshumidificador de secado de madera [18].

2.1.8.6 Secado por inmersión

En este proceso se mete el tronco o madero en una piscina, y por el empuje del agua por uno de los lados del madero la savia sale empujada por el lado opuesto, así se

consigue que, al eliminar la savia, la madera no se pudra; aunque prive a la madera de algo de dureza y consistencia, ganará en duración. Este proceso dura varios meses, tras los cuales la madera secura más deprisa porque no hay savia [3].

2.1.8.7 Secado mixto

En este proceso se juntan el natural y el artificial: Se empieza con un secado natural que elimina la humedad en un 20-25% para proseguir con el secado artificial hasta llegar al punto de secado o de eliminación de humedad deseado [4].

2.1.8.8 Secado por bomba de calor

Este proceso es otra aplicación del sistema de secado por vaporización, con la aplicación de la tecnología de Bomba de calor al secado de la madera; permite la utilización de un circuito cerrado de aire en el proceso, ya que, al aprovecharse la posibilidad de condensación de agua por parte de la bomba de calor, de manera que no es necesaria la entrada de aire exterior para mantener la humedad relativa de la cámara de la nave y evitar así desfases de temperatura y humedad [5].



Figura 2-8. Secador por bomba de calor [18].

2.1.9 Intercambiadores de calor

Los intercambiadores de calor son dispositivos que tiene como tarea principal lograr que el calor sea transferido de un lugar a otro, o de un fluido a otro. Es importante saber que a los intercambiadores de calor también se los conoce como dispositivos

utilizados para remover calor de un punto a otro en una determinada aplicación y de una manera específica y controlada [6].

2.1.9.1 Intercambiador de calor de tubo doble

Es un dispositivo formado por dos tubos concéntricos, donde uno de los fluidos pasa por el interior del tubo de diámetro menor y el otro fluido por el espacio comprendido entre los tubos [6].



Figura 2-9. Intercambiador de calor de tubo doble [18].

En este tipo de intercambiadores se puede aplicar dos disposiciones de flujo:

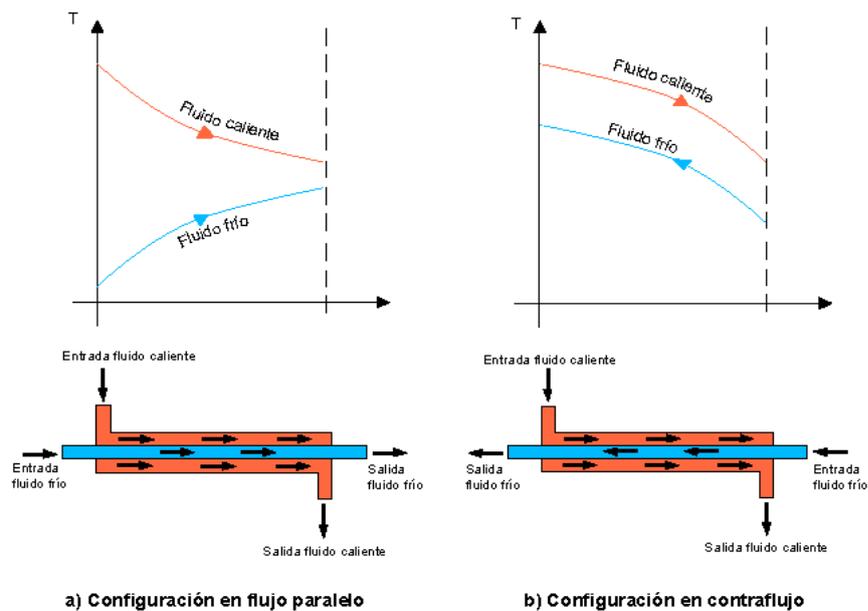


Figura 2-10. Flujo paralelo y contraflujo [18].

- Flujo paralelo: los dos fluidos (frío y caliente) se mueven en la misma dirección y sentido.
- Contraflujo: los fluidos ingresan por extremos opuestos y se mueven en la misma dirección, pero sentidos contrarios [6].

2.1.9.2 Intercambiador de calor de casco y tubos

Este tipo de intercambiador posee una gran cantidad de tubos paralelos entre sí y al eje del casco que los contiene, el flujo de calor se produce debido a que uno de los fluidos circula por el interior de los tubos, mientras que el otro por fuera de ellos.

En la práctica se suele instalar elementos llamados desviadores para hacer que el fluido se mueva en dirección transversal al casco, para colaborar con la transferencia de calor [7].

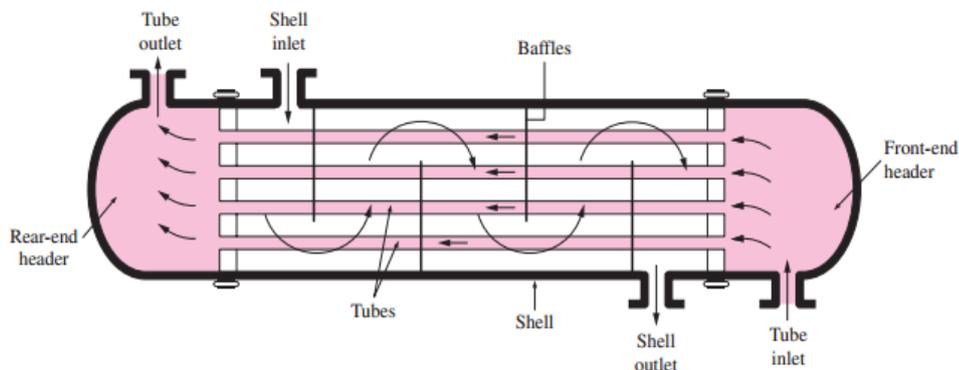


Figura 2-11. Intercambiador de calor de casco y tubos [19].

2.1.9.3 Intercambiador de calor de placas y armazón

Es un dispositivo que consta de una serie de pasos corrugados, donde los fluidos frío y caliente circulan en pasos alternados, de esta manera se consigue que el fluido frío quede rodeado por dos corrientes de fluido caliente, logrando una transferencia eficaz [7].

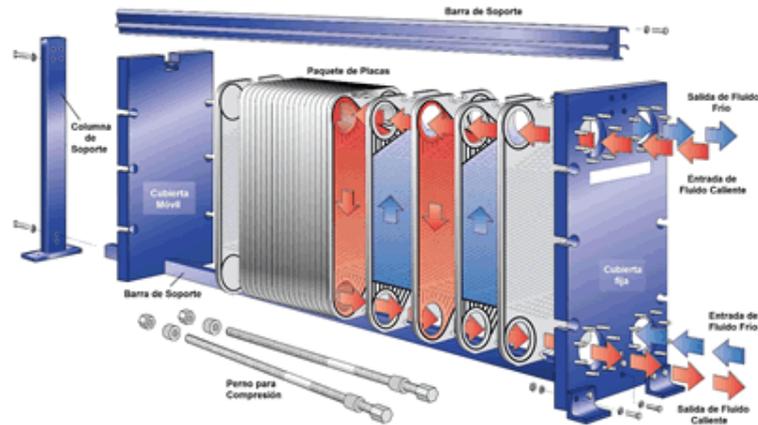


Figura 2-12. Intercambiador de calor de placas y armazón [19].

2.1.10 Transferencia de calor

La transferencia de calor es la ciencia encargada de analizar y predecir el intercambio de energía en función de diferencias de temperatura. El objetivo de la transferencia de calor es estudiar la energía transferida y la rapidez con la que se da en condiciones específicas [7].

2.1.10.1 Transferencia de calor por conducción

Establece que la transferencia de energía se produce desde la zona de alta temperatura hacia la de baja temperatura. La conductividad depende del material, es por eso que existen materiales denominados conductores y otros aislantes [9].

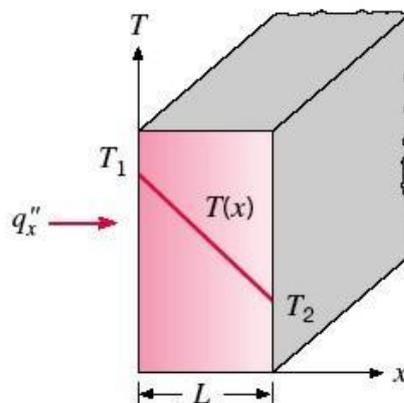


Figura 2-13. Transferencia de calor por conducción [6].

El calor es directamente proporcional al área de transferencia y al gradiente normal de temperatura. La ecuación está dada por:

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad \text{Ec.2-1}$$

$q \rightarrow$ flujo de calor (W)

$\frac{dT}{dx} \rightarrow$ gradiente de temperatura $\left(\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{m}}\right)$

$A \rightarrow$ área de transferencia (m^2)

$k \rightarrow$ conductividad térmica del material $\left(\frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{C}}\right)$

2.1.10.2 Transferencia de calor por convección

Este tipo de transferencia de calor se produce no por contacto directo de materiales, sino más bien por la interacción de un material cualquier con su medio circundante, comúnmente aire.

La velocidad del aire influye directamente en el proceso de transferencia de calor, una velocidad alta produce un gradiente de temperatura grande [8].

Para expresar el efecto global de la convección, se utiliza la ley de Newton del enfriamiento:

$$q = hA(T_s - T_{\infty}) \quad \text{Ec.2-2}$$

$q \rightarrow$ flujo de calor (W)

$A \rightarrow$ área de transferencia (m^2)

$h \rightarrow$ coeficiente de convección del medio $\left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}\right)$

$T_s \rightarrow$ temperatura de superficie ($^{\circ}\text{C}$)

$T_{\infty} \rightarrow$ temperatura del medio circundante ($^{\circ}\text{C}$)

La convección puede ser natural, es decir sin dispositivos externos que influyan en el medio circundante y convección forzada, como es el caso de la acción de un ventilador que sopla aire sobre la placa.

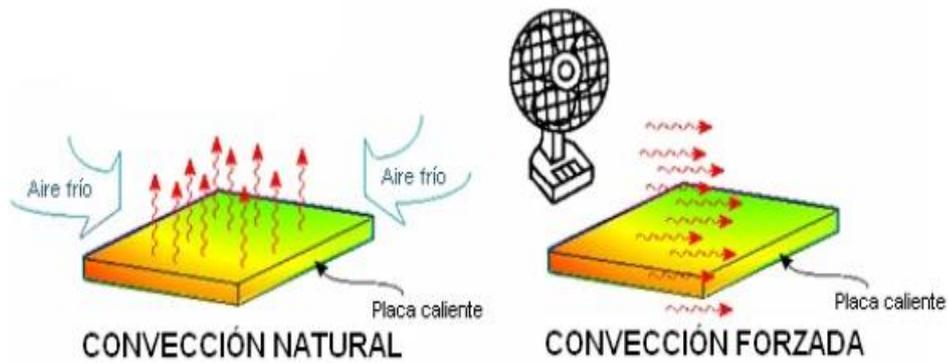


Figura 2-14. Transferencia de calor por convección [20].

2.1.10.3 Convección natural

La convección natural es producida únicamente por la diferencia de temperaturas del fluido en la presencia de una fuerza gravitacional; la densidad de un fluido disminuye con el incremento de temperatura [10].

Los parámetros a considerar en el cálculo son los siguientes:

- Coeficiente volumétrico de expansión térmica: define la variación de volumen cuando varía la temperatura.

$$\beta = \frac{1}{T} \quad \text{Ec.2-3}$$

$\beta \rightarrow$ coeficiente de expansión volumétrica (K^{-1})

$T \rightarrow$ temperatura promedio (K)

- Número de Grashof: tiene el mismo significado que el número de Reynolds, establece la relación de fuerzas de movimiento entre fuerzas de resistencia o viscosas.

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot x^3}{\nu^2} \quad \text{Ec.2-4}$$

$Gr \rightarrow$ número de Grashof

$g \rightarrow$ aceleración gravitacional (m/s^2)

$\beta \rightarrow$ coeficiente de expansión volumétrica (K^{-1})

$T_s \rightarrow$ temperatura de superficie ($^{\circ}C$)

$T_{\infty} \rightarrow$ temperatura del medio circundante ($^{\circ}C$)

$x \rightarrow$ longitud de la configuración geométrica (m)

$\nu \rightarrow$ viscosidad cinemática del fluido (m^2/s)

- Número de Rayleigh: es un número adimensional, aunque indica la fuerza y la presencia de la convección dentro de un fluido.

$$Ra = Gr * Pr \quad \text{Ec.2-5}$$

$Ra \rightarrow$ número de Rayleigh

$Gr \rightarrow$ número de Grashof

$Pr \rightarrow$ número de Prandtl

2.1.10.4 Radiación

A diferencia de los mecanismos de transferencia de calor por conducción y convección en los que el transporte de energía necesita de un medio para llevarse a cabo, el calor puede propagarse por radiación incluso en el vacío [10].

La radiación térmica se define como la energía radiante emitida por un medio como consecuencia de su temperatura y la escala de longitudes de onda.

$$q = e * \sigma * A * T^4 \quad \text{Ec.2-6}$$

$e \rightarrow$ emisividad del objeto

$\sigma \rightarrow$ coeficiente de Stefan – Boltzmann ($5.67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$)

$A \rightarrow$ área de transferencia (m^2)

$T \rightarrow$ Temperatura de la superficie (K)

2.1.11 Balance de Energía

2.1.11.1 Balance de energía en sistemas cerrados

El principio que rige los balances de energía es la ley de conservación de la energía que establece que la energía no puede crearse ni destruirse (excepto en procesos nucleares).

Esta ley es también llamada primer principio de la termodinámica. En la más general de sus formas, la primera ley dice que la velocidad a la cual la energía (cinética + potencial + interna) es ingresada a un sistema por un fluido, más la velocidad a la cual ingresa energía en forma de calor, menos la velocidad a la cual la energía es transportada por el fluido fuera del sistema, menos la velocidad a la cual el sistema realiza trabajo sobre los alrededores, es igual a la velocidad a la cual la energía se acumula en el sistema [11].

El balance integral de un sistema cerrado debe ser planteado entre dos instantes de tiempo. Como la energía no puede crearse ni destruirse, los términos de generación o consumo no tienen sentido, llegando a:

$$\dot{A} = \dot{E} - \dot{S} \quad \text{Ec.2-7}$$

$\dot{A} \rightarrow$ *acumulación (W)*

$\dot{E} \rightarrow$ *entrada (W)*

$\dot{S} \rightarrow$ *salida (W)*

Cuando planteamos los balances de masa en un sistema cerrado, los términos de entrada y salida de materia se cancelan, ya que no había cruce de masa en las fronteras del sistema.

Sin embargo, en un sistema cerrado, la energía puede ser transferida en los límites del sistema como calor o trabajo, por lo tanto, los términos anteriores de entrada y salida no pueden eliminarse.

Por lo expuesto, el balance integral de energía de un sistema cerrado será:

$$\dot{E}_f - \dot{E}_o = \dot{E}_n \quad \text{Ec.2-8}$$

$\dot{E}_f \rightarrow$ energía final del sistema (W)

$\dot{E}_o \rightarrow$ energía inicial del sistema (W)

$\dot{E}_n \rightarrow$ energía neta transferida (W)

$$\dot{E}_o = \dot{U}_o + \dot{E}c_o + \dot{E}P_o \quad \text{Ec.2-9}$$

$\dot{E}_o \rightarrow$ energía inicial del sistema (W)

$\dot{U}_o \rightarrow$ energía interna inicial del sistema (W)

$\dot{E}c_o \rightarrow$ energía cinética inicial del sistema (W)

$\dot{E}P_o \rightarrow$ energía potencial inicial del sistema (W)

$$\dot{E}_f = \dot{U}_f + \dot{E}c_f + \dot{E}P_f \quad \text{Ec.2-10}$$

$\dot{E}_f \rightarrow$ energía final del sistema (W)

$\dot{U}_f \rightarrow$ energía interna final del sistema (W)

$\dot{E}c_f \rightarrow$ energía cinética final del sistema (W)

$\dot{E}P_f \rightarrow$ energía potencial final del sistema (W)

$$\dot{E}_n = \dot{Q} - \dot{W} \quad \text{Ec.2-11}$$

$\dot{E}_n \rightarrow$ energía neta transferida (W)

$\dot{Q} \rightarrow$ flujo de calor (W)

$\dot{W} \rightarrow$ trabajo desarrollado por unidad de tiempo (W)

Por lo tanto:

$$\Delta\dot{U} + \Delta\dot{E}c + \Delta\dot{E}p = \dot{Q} - \dot{W} \quad \text{Ec.2-12}$$

La última ecuación es conocida como la Primera Ley de la Termodinámica para sistemas cerrados [11].

2.1.11.2 Balance de energía en sistemas abiertos en estado estacionario

Por definición de proceso abierto, en estos hay un flujo de materia que atraviesa los límites del mismo mientras el proceso se lleva a cabo. Por lo tanto, para que la masa ingrese al sistema es necesario efectuar un trabajo para empujar esta masa en el sistema y el sistema debe realizar un trabajo sobre los alrededores para que la masa pueda salir del sistema. Ambos trabajos deben ser incluidos en el balance de energía, y la diferencia entre ambos es el trabajo de flujo. En realidad, en estos sistemas, más que hablar de trabajo decimos velocidad de transferencia de energía o trabajo por unidad de tiempo [11].

2.1.12 Eficiencia en el intercambiador de calor

En muchas situaciones lo único que se conoce es la descripción física del intercambiador, como el número y tamaño de los tubos, número de pasos de tubos, número de pasos por la carcasa, etc., y las temperaturas de entrada de los fluidos caliente TC1 y frío TF1. La eficiencia compara la velocidad de transferencia térmica real, que es la absorbida por el fluido que se calienta, con la velocidad de transferencia térmica máxima que podría transmitirse en un intercambiador en contracorriente de superficie de intercambio infinita, cuyos límites viene impuestos por el Segundo Principio de la Termodinámica, que tiene en cuenta los focos térmicos a las temperaturas extremas TF1 (foco frío) y TC1 (foco caliente).

2.2 Hipótesis

¿En qué grado el incremento de la capacidad productiva diaria en la Empresa Arboriente S.A afecta a la eficiencia del proceso de secado?

2.3 Señalamiento de variables de la hipótesis

Variable independiente: Incremento de la capacidad productiva diaria.

Variable dependiente: Eficiencia del proceso.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

3.1 Nivel o tipo de investigación

Correlacional, puesto que se busca demostrar relación directa entre el aumento de la eficiencia del proceso frente al incremento de la productividad diaria, mediante herramientas matemáticas; considerando el entorno en el que el proceso se desarrolla; logrando un acercamiento real a los resultados.

Explicativa, se desea encontrar la validez de la interrelación de varios factores que actúan simultáneamente en el proceso, midiendo el efecto de uno sobre otro, en este caso; el efecto positivo que el análisis térmico aportará para determinar el impacto del incremento de la productividad, sobre la eficiencia general.

3.2 Población y muestra

Para efectuar el análisis se prescindió de métodos estadísticos de estudio, puesto que se realizó un estudio de casos, en el cual se analiza en forma técnica elementos mecánicos definidos, de acuerdo a los siguientes parámetros involucrados.

Tabla 3-1. Elementos de estudio [21].

ELEMENTO	MATERIAL
Toberas	Acero laminado en caliente
Rodillos	Acero estructural DIN 1.0050
Perfil	Acero estructural A36
Puerta	Acero estructural laminado en frío
Aislante	Fibra de vidrio
Madera	Madera laminada

3.3 Operacionalización de variables

3.3.1 Variable independiente

Incremento de la capacidad productiva diaria.

CONCEPTO	CATEGORÍA	INDICADOR	ÍTEMS	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS
El incremento de la capacidad productiva diaria, consiste en hacer trabajar a la cámara de secado a su capacidad máxima, con la finalidad de aprovechar el calor útil.	Capacidad productiva	Flujo volumétrico de la madera a secar	Mínimo: $20.81 \text{ m}^3/\text{dia}$ Promedio: $25.17 \text{ m}^3/\text{dia}$ Máximo: $31.96 \text{ m}^3/\text{dia}$	Hoja de datos
	Calor útil	Potencia aprovechada	¿Cuál es la potencia máxima aprovechable?	Hoja de cálculo

3.3.2 Variable dependiente

Eficiencia del proceso

CONCEPTO	CATEGORÍA	INDICADOR	ÍTEMS	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS
<p>La eficiencia del proceso es un coeficiente adimensional calculado como el cociente de la energía aprovechada (en un ciclo de funcionamiento) y la energía suministrada (para que logre completar el ciclo termodinámico).</p>	<p>Eficiencia</p>	<p>Calor suministrado</p> <p>Calor aprovechado</p> <p>Calor no aprovechado</p>	<p>850 Kg/h vapor</p> <p>¿Cuál es la cantidad de calor aprovechado?</p> <p>¿Cuál es la cantidad de calor no aprovechado?</p>	<p>Investigación bibliográfica</p> <p>Hoja de datos</p> <p>Hoja de cálculo</p>

3.4 Plan de recolección de información

Para esta etapa de la investigación, la información se obtuvo de fuentes primarias, es decir, desde el mismo sitio donde se encuentra el proceso en estudio y fuentes secundarias, necesarias para obtener parámetros físicos en función de las variables en estudio.

Se realizaron visitas frecuentes a la planta industrial de ARBORIENTE S.A., las mismas que sirvieron para obtener información real sobre capacidad mínima, media y máxima productiva, potencia de la caldera y distribución de la misma, componentes y materiales de los elementos constitutivos de la cámara de secado, temperatura ambiente y de trabajo de la máquina, e información complementaria del ambiente laboral.

En la siguiente tabla se establece fechas en las que se realizó la recolección de los datos más representativos para el estudio.

Tabla 3-2. Plan de recolección de información

PLAN RECOLECCIÓN INFORMACIÓN	
PARÁMETRO	FECHA
Capacidad de producción de láminas	09 Ene.-14 Ene.
Producción de calor de la caldera	16 Ene.-17 Ene.
Distribución de calor producido de la caldera	18 Ene.-21 Ene.
Presión de vapor de la caldera	23 Ene.
Componentes del secador	24 Ene.-28 Ene.
Medición de temperaturas	30 Ene.-04 Feb.

Por otro lado, la información secundaria fue obtenida de fuentes bibliográficas, esto contribuyó al método de cálculo y análisis de fenómenos térmicos que se producen durante todo el proceso.

3.5 Plan de procesamiento y análisis

Una vez recolectada toda la información primaria y secundaria, mediante observación directa e investigación bibliográfica, se procedió a clasificarla y organizarla, para facilitar su interpretación y posterior utilidad que se le pueda dar.

El análisis de la información recolectada se realizó desde el punto de vista de análisis térmico, estableciendo condiciones actuales de operación, sostenidos en la información recolectada, relacionando así las variables de la investigación, estableciendo conclusiones y recomendaciones.

En la siguiente tabla se muestra el plan de procesamiento a realizar para cumplir con los objetivos del proyecto:

Tabla 3-3. Plan de procesamiento de información

PLAN PROCESAMIENTO INFORMACIÓN	
No.	ACTIVIDAD
1	Análisis de pérdidas de calor del aire interior
2	Análisis de pérdidas de calor por convección forzada
3	Análisis de pérdidas de calor por conducción
4	Análisis de pérdidas de calor por radiación
5	Análisis de calor consumido por la madera
6	Flujo de calor total consumido
7	Análisis de calor suministrado
8	Cálculo de la eficiencia

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Recolección de datos

4.1.1 Parámetros de operación

Con la finalidad de realizar el análisis térmico en el proceso de secado de madera laminada, la Empresa Arboriente S.A en la ciudad de Puyo, facilitó datos de operación que influyen directamente en el desempeño del equipo mencionado.

En la siguiente figura se muestra el equipo utilizado como secador continuo dentro de la Empresa, el cual se encuentra operativo, aunque no necesariamente desarrollando la mejor eficiencia posible.



Figura 4-1. Secador continuo de láminas [21].

El secador continuo es uno de los equipos con mayor carga horaria laboral, debido a que su operación es ininterrumpida las 24 horas del día; inicia a las 6 am del día lunes y finaliza a las 6 am del día sábado de cada semana. Aunque el valor de la frecuencia para paso de láminas va a depender del tipo de madera y por ende de su

humedad, se posee valores medios para este parámetro, que es uno de los más importantes para el estudio a desarrollar.

A continuación, se muestra una tabla con algunas características físicas del proceso de secado:

Tabla 4-1. Hoja de registro de datos secador continuo [21].

SECADOR CONTINUO DE LÁMINAS - 6 CÁMARAS			
Marca:	BENECKE	Capacidad máxima de producción (laminas):	31,96 m^3/dia
Temperatura ambiente:	22°C	Capacidad promedio de producción:	25,17 m^3/dia
Paso de láminas:	3 a 30 min	Capacidad mínima de producción:	20,81 m^3/dia
Temperatura promedio	160 °C	Presión de vapor(prom):	130 psi
Puesta en operación:	03/01/1995	Consumo vapor necesario:	850 kg/h

4.1.2 Componentes principales de la cámara de secado

Los elementos principales que forman parte de la cámara de secado se presentan a continuación, con los materiales de los cuales están constituidos y sus respectivos calores específicos.

Tabla 4-2. Elementos y materiales constitutivos de la cámara de secado [21].

ELEMENTO	MATERIAL	CALOR ESPECÍFICO (J/Kg.K)
Toberas	Acero laminado en caliente	484
Rodillos	Acero estructural DIN 1.0050	505.32
Perfil	Acero estructural A36	505.32
Puerta	Acero estructural laminado en frío	495.12
Aislante	Fibra de vidrio	795
Cadena	Acero inoxidable	510
Engranajes	Hierro fundido	460.24

4.1.3 Temperatura de elementos constitutivos de la cámara

Para determinar las pérdidas de calor que se producen en los elementos constitutivos de las cámaras de secado, los cuales influyen directamente en la eficiencia de la máquina en estudio, se realizó las mediciones de temperatura antes de iniciar el proceso de funcionamiento y una vez estabilizado el proceso de funcionamiento.

Tabla 4-3. Temperatura inicial componentes

TEMPERATURA INICIAL (°C)		
PERFIL	CADENA	ENGRANES
22	22	22

Tabla 4-4. Temperatura de operación componentes

CÁMARA	TEMPERATURA DE OPERACIÓN (°C)		
	PERFIL	CADENA	ENGRANES
1	145	135	150
2	145	135	150
3	145	130	140
4	150	135	155
5	155	140	150
6	145	135	145
PROMEDIO	147.5	135	148.33

4.1.4 Temperatura paredes

El secador está formado por seis cámaras, todas dispuestas una a continuación de otra; con la finalidad de determinar la temperatura promedio de las puertas de las cámaras de secado se consideró 10 puntos en cada una de ellas como se muestra a continuación:



Figura 4-2. Cámara No. 4 secador continuo

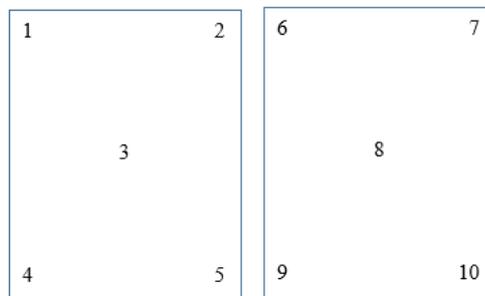


Figura 4-3. Toma de temperaturas Compuerta fija

Las temperaturas externas que se muestran a continuación representan las mediciones realizadas en los puntos indicados en cada una de las cámaras para desarrollar un cálculo de pérdidas de calor más aproximado.

Tabla 4-5. Datos temperatura externa pared

Cámara	Temperatura externa pared (°C)									
	Puntos de referencia									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	58.3	64.1	45.2	58.3	59.1	63.4	68.4	56.4	61.0	53.5
2	60.2	58.4	66.1	62.3	55.1	59.4	63.5	59.9	65.2	53.6
3	49.6	56.2	65.2	68.9	56.7	68.5	61.3	54.8	70.2	71.5
4	61.6	74.0	51.4	50.4	61.2	69.4	71.3	48.9	51.4	57.2
5	59.7	62.3	58.7	68.2	61.1	59.7	65.3	56.2	65.7	68.9
6	62.5	57.9	54.6	63.8	63.4	58.5	60.4	58.7	53.4	70.5

Con los datos recopilados en la tabla anterior, se determina la temperatura promedio de la pared externa de cada una de las cámaras.

Tabla 4-6. Temperatura promedio pared externa

Cámara	$\sum T_s$ (°C)	T_s (°C)
1	587.7	58.77
2	603.7	60.37
3	622.9	62.29
4	596.8	59.68
5	625.8	62.58
6	603.7	60.37

De la misma manera se realizó la medición de la pared interna de las cámaras de secado, datos necesarios para el posterior análisis de conducción.

Tabla 4-7. Temperatura interna pared

Cámara	Temperatura interna pared (°C)
1	145
2	152
3	148
4	150
5	151
6	147

4.1.5 Análisis de Convección Natural

La transferencia de calor por convección es uno de los parámetros a analizar debido a que el flujo de calor es directamente proporcional a la diferencia entre la temperatura ambiente y temperatura de la superficie del equipo, la cual coincide con la temperatura de la pared externa de las cámaras de secado.

La tabla que se presenta a continuación muestra los valores de las temperaturas a considerar para el análisis de convección:

Tabla 4-8. Temperatura ambiente y de superficie

TEMPERATURAS AMBIENTE Y DE SUPERFICIE			
PARÁMETRO	CÁMARA	MAGNITUD	UNIDAD
Temperatura ambiente $T_0(^{\circ}\text{C})$	Todas	22	$^{\circ}\text{C}$
Temperatura de superficie $T_s(^{\circ}\text{C})$	1	58.77	$^{\circ}\text{C}$
	2	60.37	$^{\circ}\text{C}$
	3	62.29	$^{\circ}\text{C}$
	4	59.68	$^{\circ}\text{C}$
	5	62.58	$^{\circ}\text{C}$
	6	60.37	$^{\circ}\text{C}$

4.1.6 Propiedades del aire

El parámetro para interpretar correctamente las propiedades del aire es la temperatura de película, la cual es la media aritmética entre la temperatura ambiente y la temperatura de superficie.

$$T_f = \frac{T_s + T_0}{2} \quad \text{Ec.4-1}$$

$T_f \rightarrow$ temperatura de película ($^{\circ}\text{C}$)

$T_s \rightarrow$ temperatura de superficie ($^{\circ}\text{C}$)

$T_0 \rightarrow$ temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$)

Tabla 4-9. Temperatura de película

TEMPERATURAS AMBIENTE Y DE SUPERFICIE				
CÁMARA	$T_0(^{\circ}\text{C})$	$T_s(^{\circ}\text{C})$	Temperatura de película T_f	
			($^{\circ}\text{C}$)	(K)
1	22	58.77	40.39	313.39
2	22	60.37	41.19	314.19
3	22	62.29	42.15	315.15
4	22	59.68	40.84	313.84
5	22	62.58	42.29	315.29
6	22	60.37	41.19	314.19

Con el valor de la temperatura de película, se puede determinar las propiedades del aire, necesarias para hallar el coeficiente de convección natural, realizando las interpolaciones adecuadas.

Tabla 4-10. Propiedades del aire [6].

PROPIEDADES DEL AIRE				
CÁMARA	T_f (°C)	Conductividad térmica $k \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$	Viscosidad cinemática $\nu \left(\frac{m^2}{s} \right)$	Número de Prandtl Pr
1	40.39	0.02722	$17.8898 \cdot 10^{-6}$	0.705054
2	41.19	0.02728	$17.9525 \cdot 10^{-6}$	0.704878
3	42.15	0.02735	$18.0277 \cdot 10^{-6}$	0.704667
4	40.84	0.02725	$17.9251 \cdot 10^{-6}$	0.704955
5	42.29	0.02736	$18.0387 \cdot 10^{-6}$	0.704636
6	41.19	0.02728	$17.9525 \cdot 10^{-6}$	0.704878

4.1.7 Cálculo de parámetros térmicos

Definidas las propiedades del aire se procede a determinar los parámetros físicos para hallar el coeficiente de convección.

A continuación, se muestran las ecuaciones utilizadas y las tablas de cálculo para facilitar el manejo de las propiedades que intervienen en cada uno de los casos.

- Coeficiente volumétrico de expansión térmica.

$$\beta = \frac{1}{T_f} \quad \text{Ec.4-2}$$

$T_f \rightarrow$ temperatura de película (K)

$\beta \rightarrow$ Coeficiente volumétrico de expansión térmica (K^{-1})

Tabla 4-11. Coeficiente volumétrico de expansión térmica

COEFICIENTE VOLUMÉTRICO DE EXPANSIÓN TÉRMICA			
CÁMARA	T_f (°C)	T_f (K)	β (K ⁻¹)
1	40.39	313.39	0.003191
2	41.19	314.19	0.003183
3	42.15	315.15	0.003173
4	40.84	313.84	0.003186
5	42.29	315.29	0.003172
6	41.19	314.19	0.003183

- Número de Grashof.

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_o)L^3}{\nu^2} \quad \text{Ec.4-3}$$

$Gr \rightarrow$ número de Grashof

$g \rightarrow$ aceleración gravitacional (m/s²)

$\beta \rightarrow$ coeficiente de expansión volumétrica (K⁻¹)

$T_s \rightarrow$ temperatura de superficie (°C)

$T_o \rightarrow$ temperatura del medio circundante (°C)

$L \rightarrow$ longitud de la configuración geométrica (m)

$\nu \rightarrow$ viscosidad cinemática del fluido (m²/s)

Tabla 4-12. Número de Grashof

NÚMERO DE GRASHOF						
CÁMARA	β (K ⁻¹)	T_s (°C)	T_o (°C)	L (m)	ν (m ² /s)	Gr
1	0.003191	58.77	22	3.1	17.8898*10 ⁻⁶	1.070*10 ¹¹
2	0.003183	60.37	22	3.1	17.9525*10 ⁻⁶	1.106*10 ¹¹
3	0.003173	62.29	22	3.1	18.0277*10 ⁻⁶	1.148*10 ¹¹
4	0.003186	59.68	22	3.1	17.9251*10 ⁻⁶	1.091*10 ¹¹
5	0.003172	62.58	22	3.1	18.0387*10 ⁻⁶	1.155*10 ¹¹
6	0.003183	60.37	22	3.1	17.9525*10 ⁻⁶	1.106*10 ¹¹

- Número de Rayleigh

$$Ra = Gr * Pr \quad \text{Ec.4-4}$$

$Ra \rightarrow$ número de Rayleigh

$Gr \rightarrow$ número de Grashof

$Pr \rightarrow$ número de Prandtl

Tabla 4-13. Número de Rayleigh

NÚMERO DE RAYLEIGH			
CÁMARA	Gr	Pr	Ra
1	$1.070*10^{11}$	0.705054	$7.544*10^{10}$
2	$1.106*10^{11}$	0.704878	$7.796*10^{10}$
3	$1.148*10^{11}$	0.704667	$8.089*10^{10}$
4	$1.091*10^{11}$	0.704955	$7.691*10^{10}$
5	$1.155*10^{11}$	0.704636	$8.139*10^{10}$
6	$1.106*10^{11}$	0.704878	$7.796*10^{10}$

- Número de Nusselt

$$Nu = \left(0.825 + \frac{0.387Ra^{\frac{1}{4}}}{\left(1 + \left(\frac{0.492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right)^2 \quad \text{Ec.4-5}$$

$Nu \rightarrow$ número de Nusselt

$Ra \rightarrow$ número de Rayleigh

$Pr \rightarrow$ número de Prandtl

Tabla 4-14. Número de Nusselt

NÚMERO DE NUSSOLT			
CÁMARA	Ra	Pr	Nu
1	$7.544*10^{10}$	0.705054	479.71
2	$7.796*10^{10}$	0.704878	484.78
3	$8.089*10^{10}$	0.704667	490.53
4	$7.691*10^{10}$	0.704955	482.68
5	$8.139*10^{10}$	0.704636	491.50
6	$7.796*10^{10}$	0.704878	484.78

- Coeficiente de convección

$$h = \frac{Nu * k}{L} \quad \text{Ec.4-6}$$

$$\bar{h} = \frac{4}{3} h \quad \text{Ec.4-7}$$

$h \rightarrow$ coeficiente de convección $\left(\frac{W}{m^2 * K} \right)$

$Nu \rightarrow$ número de Nusselt

$k \rightarrow$ coeficiente de conducción $\left(\frac{W}{m * K} \right)$

$L \rightarrow$ longitud cámara (m)

$\bar{h} \rightarrow$ coeficiente medio de convección $\left(\frac{W}{m^2 * K} \right)$

Tabla 4-15. Coeficiente de convección

COEFICIENTE DE CONVECCIÓN					
CÁMARA	Nu	$k \left(\frac{W}{m * K} \right)$	$L (m)$	$h \left(\frac{W}{m^2 * K} \right)$	$\bar{h} \left(\frac{W}{m^2 * K} \right)$
1	479.71	0.02722	12.2	4.212	5.616
2	484.78	0.02728	12.2	4.266	5.688
3	490.53	0.02735	12.2	4.328	5.771
4	482.68	0.02725	12.2	4.243	5.657
5	491.50	0.02736	12.2	4.338	5.784
6	484.78	0.02728	12.2	4.266	5.688

4.1.8 Calor perdido por el aire interior

Una vez determinado el coeficiente de convección, se presenta en la siguiente tabla el calor perdido por el aire interior en cada una de las cámaras de secado, mediante la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{aire} = \bar{h} * A * (T_s - T_o) \quad \text{Ec.4-8}$$

$\dot{Q}_{aire} \rightarrow$ flujo de calor por convección (W)

$\bar{h} \rightarrow$ coeficiente medio de convección $\left(\frac{W}{m^2 * K} \right)$

$A \rightarrow$ área de transferencia (m^2)

$T_s \rightarrow$ temperatura de superficie ($^{\circ}C$)

$T_o \rightarrow$ temperatura del medio circundante ($^{\circ}C$)

Tabla 4-16. Calor perdido por convección natural

CALOR PERDIDO POR CONVECCIÓN NATURAL					
CÁMARA	$\bar{h} \left(\frac{W}{m^2 * K} \right)$	$A (m^2)$	$\Delta T = T_s - T_o$	$\dot{Q}_{aire} (W)$	
1	5.616	24.4	36.77	5038.61	
2	5.688	24.4	38.37	5325.26	
3	5.771	24.4	40.29	5673.33	
4	5.657	24.4	37.68	5201.00	
5	5.784	24.4	40.58	5727.04	
6	5.688	24.4	38.37	5325.26	
				$\dot{Q}_{T\ aire} (W)$	32290.5
				$\dot{Q}_{T\ aire} (KW)$	32.29

4.1.9 Análisis de Convección Forzada

En la parte superior de las cámaras de secado, están ubicados ventiladores con la finalidad de disipar el calor producido por la máquina, por lo que es necesario determinar el calor perdido por este tipo de convección, para lo cual se posee como datos de entrada las características principales del ventilador.

Tabla 4-17. Características Ventilador [21].

CARACTERÍSTICAS VENTILADOR	
Diámetro ducto $\phi (m)$	0.64
Temperatura Operación $T(^{\circ}C)$	148.83
Velocidad de operación $V(m/s)$	5

Con estas características se procede a determinar las propiedades térmicas del aire para hallar el coeficiente de convección, el mismo que será desarrollado para una de las cámaras, debido a que los ventiladores usados son los mismos en cada una de ellas y la temperatura de operación no varía considerablemente.

Tabla 4-18. Propiedades térmicas del aire [6].

PROPIEDADES DEL AIRE @ 148.83 °C	
Viscosidad dinámica u (Kg/ms)	$2.372 * 10^{-5}$
Conductividad térmica k (W/m°C)	0.035
Calor específico c_p (KJ/Kg°C)	1.017
Densidad ρ (Kg/m ³)	0.839
Pr	0.686

Con estas propiedades se procede a determinar el número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho * V * \phi}{u} \quad \text{Ec.4-9}$$

$Re \rightarrow$ número de Reynolds

$\rho \rightarrow$ densidad del aire (Kg/m³)

$V \rightarrow$ velocidad de operación (m/s)

$\phi \rightarrow$ diámetro del ducto (m)

$u \rightarrow$ viscosidad dinámica (Kg/ms)

$$Re = \frac{0.839 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * \frac{5\text{m}}{\text{s}} * 0.64 \text{ m}}{2.372 * 10^{-5} \text{ Kg/ms}}$$

$$Re = 113187.18 \quad \text{Flujo turbulento}$$

$$Nu = 0.023 * Re^{0.8} * Pr^{0.4} \quad \text{Ec.4-10}$$

$$Nu = 0.023 * (113187.18)^{0.8} * (0.686)^{0.4}$$

$$Nu = 218.42$$

$$h = \frac{Nu * \rho * c_p * V}{Re * Pr} \quad \text{Ec.4-11}$$

$$h = \frac{218.42 * 0.839 * 1017 * 5}{113187.18 * 0.686}$$

$$h = 12 \frac{W}{m^2 * K}$$

$$\dot{Q}_{forz} = 6 * h * A * \Delta T \quad \text{Ec.4-12}$$

$\dot{Q}_{forz} \rightarrow$ flujo de calor por convección forzada (W)

$h \rightarrow$ coeficiente de convección $\left(\frac{W}{m^2 * K}\right)$

$A \rightarrow$ área de transferencia (m^2)

$\Delta T \rightarrow$ variación de temperatura ($^{\circ}C$)

$$\dot{Q}_{forz} = 6 * h * \pi * \phi * L * \Delta T$$

$$\dot{Q}_{forz} = 6 * 12 * \pi * 0.64 * 0.835 * (148.83 - 22)$$

$$\dot{Q}_{forz} = 15331.01 W = 15.33 KW$$

4.1.10 Análisis de pérdidas de calor por conducción

Con la finalidad de obtener el calor desechado por cada uno de los componentes de una etapa de la cámara de secado, se desarrolló la modelación para obtener de manera más aproximada la masa de cada uno de ellos y facilitar su estudio.

En la siguiente tabla se presenta los componentes de la máquina de secado, con el material utilizado y la masa obtenida en software.

Es necesario recalcar que la masa de la puerta y aislante es de una sola cámara de secado.

Tabla 4-19. Masa de los componentes

MASA DE LOS COMPONENTES			
COMPONENTE	No. ELEMENTOS	MASA (Kg)	MASA TOTAL (Kg)
Toberas	36	35.36	1272.96
Rodillos	21	25.45	534.45
Perfil C	14	17.86	250.04
Puerta	4	46.78	187.12
Aislante	4	7.16	28.64

El calor disipado por cada uno de los componentes se calcula mediante la ecuación que se presenta a continuación:

$$Q = m * c * \Delta T \quad \text{Ec.4-13}$$

$Q \rightarrow$ calor disipado por los componentes (J)

$c \rightarrow$ calor específico del material (J/Kg.K)

$\Delta T \rightarrow$ variación de temperatura (°C)

Tabla 4-20. Calor disipado por los componentes

CALOR DISIPADO POR LOS COMPONENTES					
COMPONENTE	m (Kg)	c (J/Kg.K)	T_o (°C)	T_{op} (°C)	Q (MJ)
Toberas	1272.96	484	22	136.5	70.54
Rodillos	534.45	505.32	22	145	33.22
Perfil C	250.04	505.32	22	147.5	15.86
Puerta	187.12	495.12	22	148.8	11.75
Aislante	28.64	795	22	118	2.19

El calor disipado es la sumatoria de los calores disipados por cada uno de los componentes:

$$Q_{comp.} = Q_{tob} + Q_{rod} + Q_{per} + Q_{pue} + Q_{ais}$$

$$Q_{comp.} = (70.54 + 33.22 + 15.86 + 11.75 + 2.19) * 6 \text{ MJ}$$

$$Q_{comp.} = 801.36 \text{ MJ}$$

El tiempo estimado en alcanzar el equilibrio térmico es de dos horas, por lo que el flujo de calor está dado por:

$$\dot{Q}_{comp.} = \frac{Q_{comp.}}{t} \quad \text{Ec.4-14}$$

$\dot{Q}_{comp.}$ → *flujo de calor disipado por los componentes (W)*

$Q_{comp.}$ → *calor disipado por los componentes (J)*

t → *tiempo en alcanzar el equilibrio (s)*

$$\dot{Q}_{comp.} = \frac{801.36 * 10^6 J}{2h * \frac{3600 s}{1h}}$$

$$\dot{Q}_{comp.} = 111300 W = 111.3 KW$$

4.1.11 Análisis de pérdidas de calor por radiación

La radiación es otro de los parámetros a considerar debido a que la temperatura de operación de los tubos del radiador (acero) es alta en comparación la temperatura ambiente.

El calor disipado por radiación está dado por la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{rad} = e * \sigma * A * T^4 * f \quad \text{Ec.4-15}$$

$\dot{Q}_{rad.}$ → *flujo de calor disipado por radiación (W)*

e → *emisividad*

A → *área de transferencia – tubos del radiador (m²)*

T → *temperatura interna de pared (K)*

f → *factor de forma (0.8)*

Tabla 4-21. Pérdidas de calor por radiación

Cámara	Emis. e	Temperatura interna pared (K)		$A_{tubos\ rad.}$ (m^2)	\dot{Q}_{rad} (KW)
		(K)	(°C)		
1	0.155	418	145	0.1378	0.037
2	0.155	425	152	0.1378	0.040
3	0.155	421	148	0.1378	0.038
4	0.155	423	150	0.1378	0.038
5	0.155	424	151	0.0689	0.020
6	0.155	420	147	0.0689	0.019
					0.192

4.1.12 Análisis de calor consumido por la madera

A continuación, se determina el calor consumido por la madera a secar en la máquina en estudio, para lo cual se presenta en la siguiente tabla las propiedades necesarias para desarrollar el análisis, así como los parámetros de operación del secador:

Tabla 4-22. Propiedades y parámetros de la madera [21].

PROPIEDAD	VALOR
Densidad madera	820 Kg/m^3
Capacidad promedio de producción	25.17 $m^3/día$
Temperatura inicial	22 °C
Temperatura final	160 °C
Porcentaje humedad inicial	46 %
Porcentaje humedad final	6 %
Calor específico agua	4186 $J/Kg.K$
Calor específico vapor de agua	1840 $J/Kg.K$
Calor latente de vaporización del agua	2260000 J/Kg

El flujo másico de madera a secar es el siguiente:

$$\dot{m} = d * \dot{V} \quad \text{Ec.4-16}$$

$\dot{m} \rightarrow$ flujo másico de la madera (Kg/s)

$d \rightarrow$ densidad de la madera (Kg/m³)

$\dot{V} \rightarrow$ flujo volumétrico de la madera (m³/s)

$$\dot{m} = 820 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 25.17 \frac{\text{m}^3}{\text{día} * \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} * \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}}}$$
$$\dot{m} = 0.239 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

El flujo de calor consumido por la madera es:

$$\dot{Q}_{mad} = (\Delta hum) * [\dot{m} * c_{H_2O} * (100 - 22)^\circ\text{C} + \dot{m} L_v + \dot{m} * c_{vap} * (160 - 100)] \quad \text{Ec.4-17}$$

$\dot{Q}_{mad} \rightarrow$ flujo de calor consumido por la madera (W)

$\Delta hum \rightarrow$ variación porcentual de la humedad de la madera

$\dot{m} \rightarrow$ flujo másico de la madera (Kg/s)

$c_{H_2O} \rightarrow$ calor específico del agua (J/Kg.K)

$c_{vap} \rightarrow$ calor específico del vapor de agua (J/Kg.K)

$L_v \rightarrow$ calor latente de vaporización (J/Kg)

$$\dot{Q}_{mad} = (0.46 - 0.06) \left[0.239 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} * 4186 \frac{\text{J}}{\text{Kg.K}} * (100 - 22)^\circ\text{C} + 0.239 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} * 2260000 \frac{\text{J}}{\text{Kg}} + 0.239 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} * 1840 \frac{\text{J}}{\text{Kg.K}} * (160 - 100)^\circ\text{C} \right]$$
$$\dot{Q}_{mad} = 257.82 \text{ KW}$$

4.1.13 Flujo de calor total consumido

$$\dot{Q}_T = \dot{Q}_{aire} + \dot{Q}_{forz} + \dot{Q}_{comp.} + \dot{Q}_{rad.} + \dot{Q}_{mad}$$

$$\dot{Q}_T = (32.29 + 15.33 + 111.3 + 0.192 + 257.82) \text{ KW}$$

$$\dot{Q}_T = 416.93 \text{ KW}$$

4.1.14 Análisis de vapor suministrado

A continuación, se calcula el calor suministrado por el flujo de vapor que ingresa al secador, para lo cual se consideran los siguientes parámetros:

Tabla 4-23. Flujo de vapor suministrado [21].

PROPIEDAD	VALOR
Flujo másico \dot{m}_v	$850 \frac{Kg}{h}$
Presión (P)	$150 \text{ psi} = 1034.214 \text{ KPa}$

Tabla 4-24. Entalpía del vapor suministrado [6].

PRESIÓN (KPa)	ENTALPÍA h_{fg} ($\frac{KJ}{Kg}$)
1000	2014.6
1034.214	2009.47
1100	1999.6

$$\dot{Q}_{vapor} = \dot{m}_v * h_{fg} \quad \text{Ec.4-18}$$

\dot{Q}_{vap} → flujo de calor del vapor suministrado (W)

\dot{m}_v → flujo másico de vapor (Kg/s)

h_{fg} → entalpía del vapor (KJ/Kg)

$$\dot{Q}_{vapor} = 850 \frac{Kg}{h} * \frac{1 h}{3600 s} * 2009.47 \frac{KJ}{Kg}$$

$$\dot{Q}_{vapor} = 474.46 \text{ KW}$$

4.1.15 Otras pérdidas no evaluadas

Existen pérdidas de calor que no pueden ser cuantificadas, debido a factores que no han podido ser considerados en el estudio, la cual posee un valor de:

$$\dot{Q}_{\text{otras pérdidas}} = 474.46 \text{ KW} - 416.93 \text{ KW}$$

$$\dot{Q}_{\text{otras pérdidas}} = 57.53 \text{ KW}$$

4.1.16 Cálculo de la eficiencia

La eficiencia está dada por el cociente del calor consumido por la madera y el calor total suministrado por el vapor.

$$n = \frac{\dot{Q}_{\text{mad}}}{\dot{Q}_{\text{vapor}}} * 100 \quad \text{Ec.4-19}$$

$n \rightarrow$ eficiencia

$\dot{Q}_{\text{mad}} \rightarrow$ flujo de calor consumido por la madera (W)

$\dot{Q}_{\text{vapor}} \rightarrow$ flujo de calor suministrado por el vapor (W)

$$n = \frac{257.82 \text{ KW}}{474.458 \text{ KW}} * 100$$

$$n = 54.34 \%$$

4.2 Análisis de Resultados

Una vez determinadas las pérdidas de flujo de calor en todas las cámaras del secador en estudio, así como el flujo de vapor suministrado y aprovechado por la madera, se estima el porcentaje que representa cada uno de ellos, lo cual se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 4-25. Resumen de valores porcentuales de flujo de calor

	Flujo de calor (KW)	%
Vapor suministrado	474.46	100 %
Madera	257.82	54.34 %
Componentes	111.3	23.46 %
Radiación	0.192	0.04 %
Aire interior	32.29	6.81 %
Convección forzada	15.33	3.23 %
Otras pérdidas	57.53	12.12 %

Es necesario recalcar, que el porcentaje que representa el flujo de calor por otras pérdidas es bajo, el cual es un indicador de que se consideró de manera correcta los parámetros físicos y térmicos que intervienen en el desarrollo del proyecto experimental.

Para una mejor apreciación de los flujos de calor suministrados, aprovechados y consumidos por cada una de las pérdidas existentes, se muestra a continuación el diagrama de Sankey, con los respectivos porcentajes.

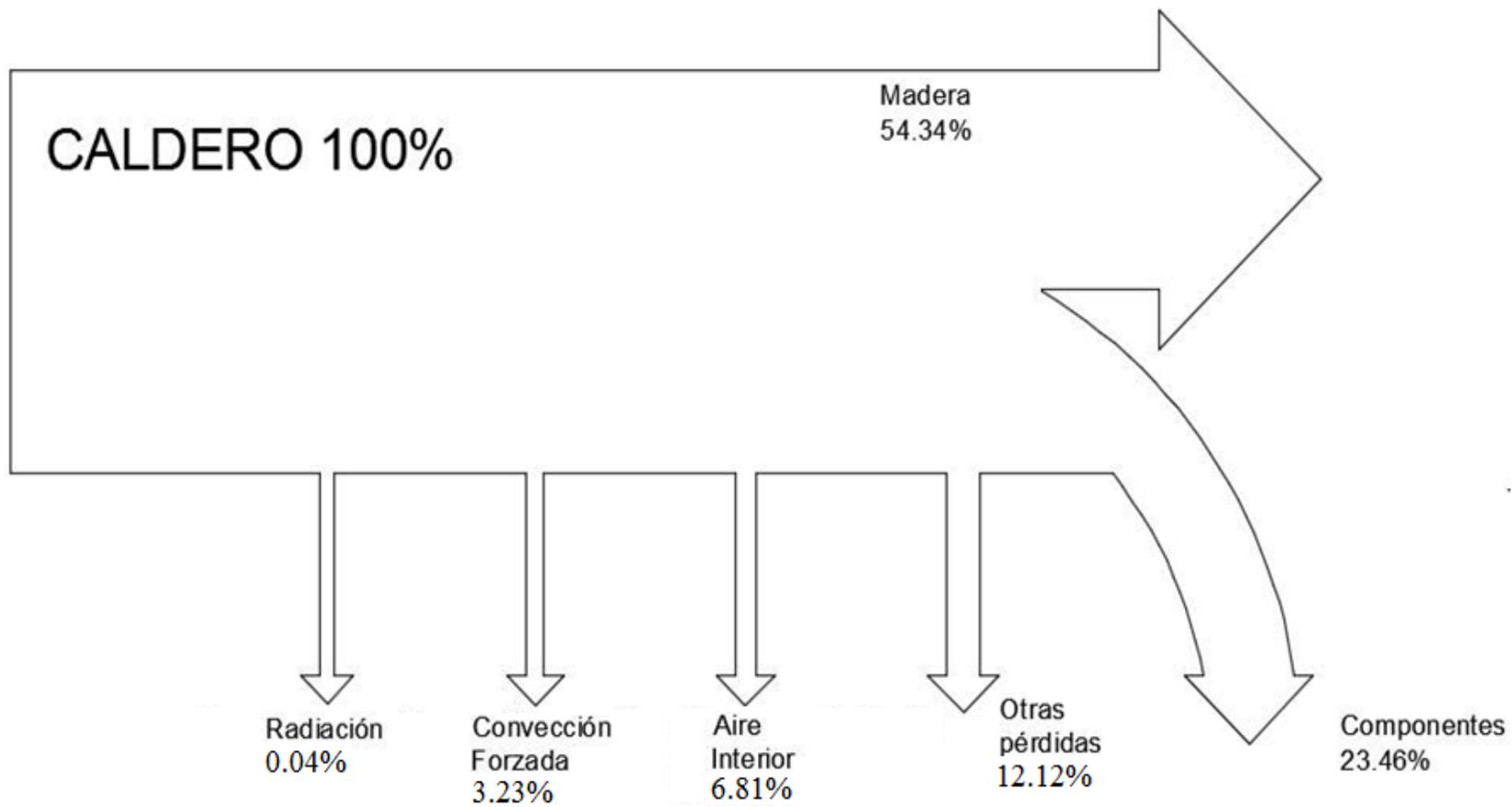


Figura 4-4. Diagrama de Sankey de pérdidas de calor

4.3 Verificación de hipótesis

Con la finalidad de demostrar la hipótesis se presenta a continuación el análisis de cálculo de flujo de calor consumido por la madera para su proceso de secado, considerando la capacidad máxima de producción y no el promedio como el estudio previo realizado:

Tabla 4-26. Propiedades y parámetros de la madera-capacidad máxima [21].

PROPIEDAD	VALOR
Densidad madera	820 Kg/m ³
Capacidad de producción	31.96 m ³ /día
Temperatura inicial	22 °C
Temperatura final	160 °C
Porcentaje humedad inicial	46 %
Porcentaje humedad final	6 %
Calor específico agua	4186 J/Kg.K
Calor específico vapor de agua	1840 J/Kg.K
Calor latente de vaporización del agua	2260000 J/Kg

La tasa de secado de madera es la siguiente:

$$\dot{m} = d * \dot{V}$$

$$\dot{m} = 820 \frac{Kg}{m^3} * 31.96 \frac{m^3}{día * \frac{24 h}{1 día} * \frac{3600 s}{1 h}}$$

$$\dot{m} = 0.3033 \frac{Kg}{s}$$

El flujo de calor consumido por la madera es:

$$\dot{Q}_{mad} = (\Delta hum) * [\dot{m} * c_{H_2O} * (100 - 22)°C + \dot{m}L_v + \dot{m} * c_{vap} * (160 - 100)]$$

$$\dot{Q}_{mad} = (0.46 - 0.06) \left[0.3033 \frac{Kg}{s} * 4186 \frac{J}{Kg.K} * (100 - 22)^{\circ}C + 0.3033 \frac{Kg}{s} * 2260000 \frac{J}{Kg} + 0.3033 \frac{Kg}{s} * 1840 \frac{J}{Kg.K} * (160 - 100)^{\circ}C \right]$$

$$\dot{Q}_{mad} = 327.19 KW$$

La eficiencia estaría dada por:

$$n = \frac{\dot{Q}_{mad}}{\dot{Q}_{vapor}} * 100$$

$$n = \frac{327.19 KW}{474.458 KW} * 100$$

$$n = 68.96 \%$$

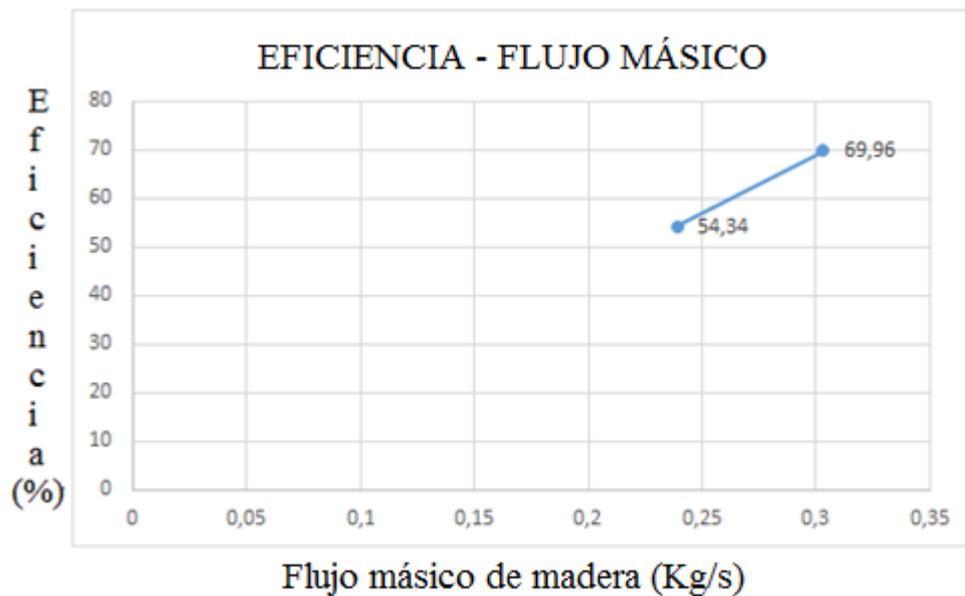


Figura 4-5. Eficiencia en función del flujo másico de madera

El aumento porcentual de eficiencia es:

$$Aumento \% n = \frac{(\Delta n) * 100}{54.34}$$

$$Aumento \% n = \frac{(68.96 - 54.34) * 100}{54.34}$$

$$Aumento \% n = 26.90 \%$$

Con esto se demuestra la hipótesis de que, si se aumenta la capacidad de producción del proceso, se aumenta considerablemente la eficiencia del mismo, provocando un aumento de la eficiencia en un 26.90 %.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Los parámetros termo físicos utilizados para desarrollar el estudio de la eficiencia de las cámaras en el proceso de secado son:
 - Masa de los elementos constitutivos de la cámara.
 - Calor específico de los elementos de la cámara.
 - Temperatura de operación de los componentes.
 - Temperatura ambiente.

PARÁMETROS TERMO FÍSICOS				
COMPONENTE	m (Kg)	c (J/Kg.K)	T_{op} (°C)	T_o (°C)
Toberas	1272.96	484	136.5	22
Rodillos	534.45	505.32	145	22
Perfil C	250.04	505.32	147.5	22
Puerta	187.12	495.12	148.8	22
Aislante	28.64	795	118	22

- Las cámaras del secador continuo en estudio poseen la capacidad media de procesar $25.17 \frac{m^3}{día}$ de madera, parámetro fundamental para cuantificar el calor útil o calor aprovechado por la madera, cuya humedad después del proceso de secado se redujo del 46% al 6%.
- El análisis de la transferencia de calor producido en el aire al interior de la cámara de secado se desarrolló en función de las propiedades

termodinámicas del aire a la temperatura de película, mientras que la convección forzada se la efectuó considerando velocidad del aire provocada por el ventilador, características mecánicas del ducto y características térmicas del aire desplazado.

PROPIEDADES DEL AIRE INTERIOR CÁMARAS DE SECADO				
CÁMARA	T_f (K)	$k \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$	$v \left(\frac{m^2}{s} \right)$	Pr
1	313.39	0.02722	$17.8898 \cdot 10^{-6}$	0.705054
2	314.19	0.02728	$17.9525 \cdot 10^{-6}$	0.704878
3	315.15	0.02735	$18.0277 \cdot 10^{-6}$	0.704667
4	313.84	0.02725	$17.9251 \cdot 10^{-6}$	0.704955
5	315.29	0.02736	$18.0387 \cdot 10^{-6}$	0.704636
6	314.19	0.02728	$17.9525 \cdot 10^{-6}$	0.704878
PARÁMETROS CONVECCIÓN FORZADA				
Diámetro ducto \varnothing (m)				0.64
Temperatura Operación T (°C)				148.83
Velocidad de operación V (m/s)				5
Viscosidad dinámica μ (Kg/ms)				$2.372 \cdot 10^{-5}$
Conductividad térmica k (W/m°C)				0.035
Calor específico c_p (KJ/Kg°C)				1.017
Densidad ρ (Kg/m ³)				0.839
Pr				0.686

- El cálculo de la eficiencia energética del secador se desarrolló mediante el cociente entre el calor aprovechado por la madera procesada y el calor total suministrado al secador por parte del caldero, siendo este valor de 54.34 %.
- El cálculo de la sumatoria de las pérdidas de calor desarrolladas por conducción, por el aire al interior de las cámaras de secado, convección

forzada, radiación, resultaron ser muy cercanas al calor del vapor total suministrado, donde las pérdidas de calor no cuantificadas alcanzaron un valor de 57.53 KW que representan el 12.12% del flujo de calor total.

5.2 Recomendaciones

- La eficiencia del proceso posee un valor de 54.34 %, por lo que se recomienda desarrollar un rediseño del secador con la finalidad de minimizar las pérdidas de calor, especialmente por conducción el cual de acuerdo al estudio desarrollado es el más crítico, el mismo que representa el 23.46% del flujo de calor total suministrado, porcentaje que es representativo en comparación con la eficiencia.
- Para mejorar la operación de la máquina y por ende el proceso de secado de la madera, es fundamental poseer un régimen de mantenimiento preestablecido, desarrollado y controlado para minimizar concentraciones de calor por acumulación de impurezas que inciden negativamente en la eficiencia del proceso.
- Es recomendable realizar varias mediciones de temperatura en los puntos críticos del equipo, para determinar la uniformidad de distribución de calor y obtener una media más cercana a la realidad y facilitar estudios posteriores para mejorar condiciones de funcionamiento.

BIBLIOGRAFÍA

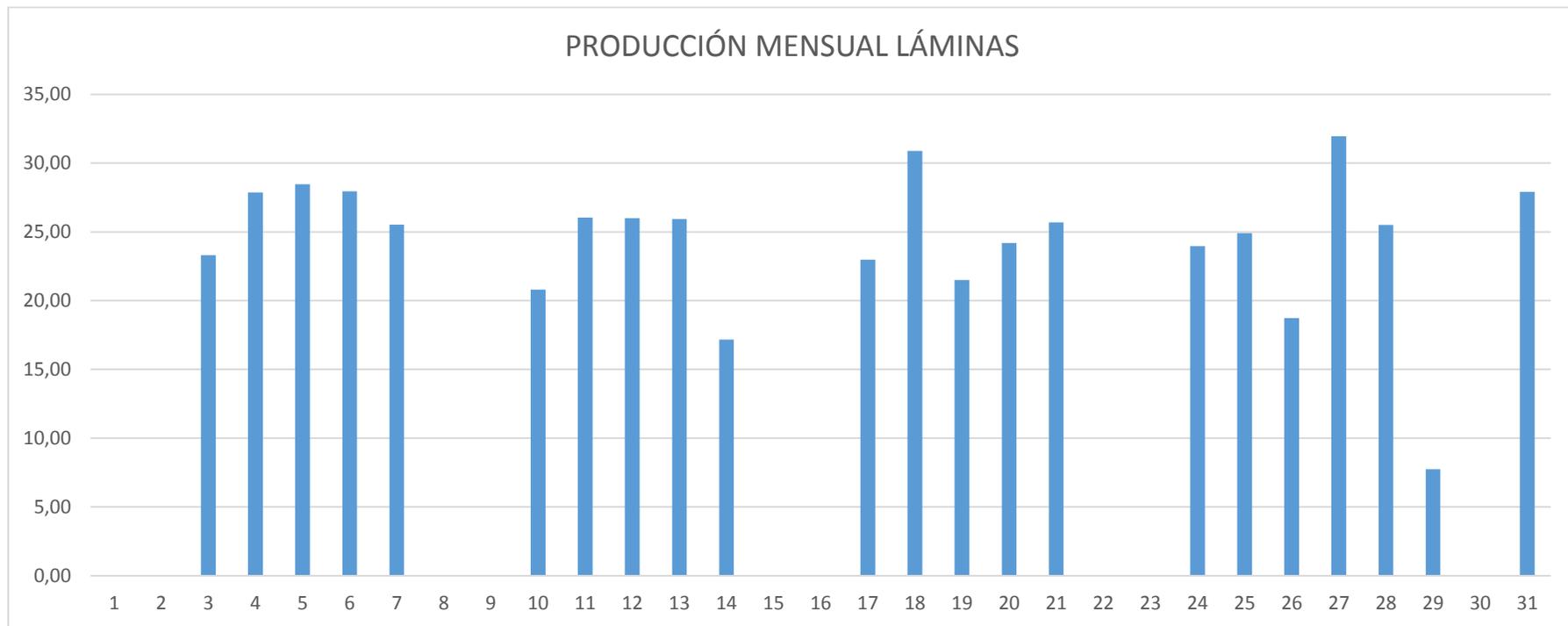
- [1] FERNÁNDEZ J. Manual Técnico de secado de Maderas. España. AITIM. Segunda Edición. 2007.
- [2] MENA M. Mejoramiento de Gestión de Conducción de Secado Industrial de Madera. España. Académica Española. 2011.
- [3] CIGALAT E. Guía de las principales maderas y de su secado. España. Mundi Prensa Libros. 2007.
- [4] PEZO J. Secado de Maderas. Chile. MAHILD. 2007.
- [5] BULIAN F. Wood Coatings: Theory and Practice. Londres. Elsevier Science. 2009.
- [6] CENGEL. Y. Transferencia de Calor y Masa. México. McGraw-Hill. Interamericana, 2004.
- [7] INCROPERA F. Fundamentos de Transferencia de Calor. México: Pearson, 2005.
- [8] HOLMAN J. Transferencia de Calor. Madrid. McGraw-Hill. Octava Edición. 2007.
- [9] MANRIQUE J. Transferencia de Calor. México. Alfaomega. Segunda Edición. 2005.
- [10] WELTY J. Fundamentos de Transferencia de Momento, Calor y Masa. México. Editorial Limusa. Segunda Edición. 2001.
- [11] BARTOMEU S. Transferencia de Calor Técnica. México. Editorial Reverté. 2003.
- [12] Productos y Herramientas. 05 Julio 2013. [En línea]. Available: www.norwoodsawmills.com/es/productos-herramientas/medidor-de-humedad

- [13] Madera – Secado Natural. 13 Mayo 2011. [En línea]. Available: www.zubirisl.com/es/Caracteristicas-bandejas-Zubiri-prefabricados.
- [14] Empresa Palets del Norte. S.A. España. [En línea]. Available: www.paletsdelnorte.com/instalaciones.html
- [15] Empresa Madera 21. Chile [En línea]. Available: www.madera21.cl/?p=2601
- [16] Daxin Electronic Science And Technology Co. [En línea]. Available: product-detail/high-frequency-electric-vacumm-timber-drying-kiln-60223423289.html
- [17] ETW Internacional – China. [En línea]. etwinternational.com.ar/1-4-rfv-kiln-for-flooring-drying-28355.html
- [18] Hangzhou Tech Drying Equipment Co. Ltd. [En línea]. es.scribd.com/document/170418250/Secado-de-Madera-Con-Horno
- [19] Intercambiadores de calor. 02 Agosto. 2014. [En línea]. cmapspublic3.ihmc.us/rid=1LV42V0H3-170XDSZ1BW3/Clasificaci%C3%B3n%20de%20intercambiadores%20de%20calor.cm
- [20] Convección. Transferencia de Calor. 23 Enero. 2014. [En línea]. transferenciadecalorunefapuntofijo.wordpress.com/2017/01/23/transferencia-de-calor/
- [21] Empresa Arboriente S.A. Madera Triplex. Puyo. 2017

ANEXOS

ANEXO A

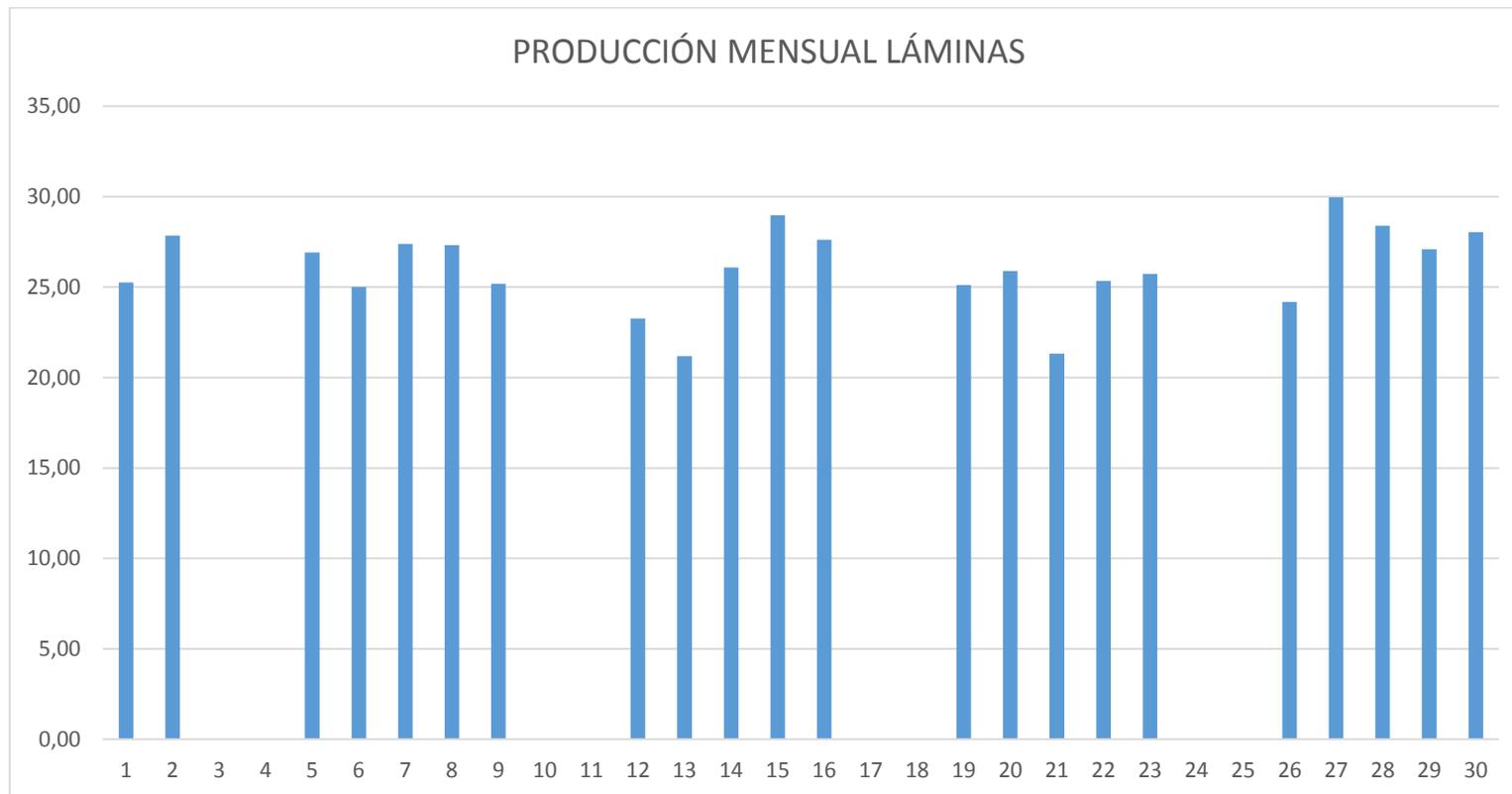
PRODUCCIÓN MENSUAL DE LÁMINAS – OCTUBRE 2016



Fuente: Arboriente S.A

ANEXO B

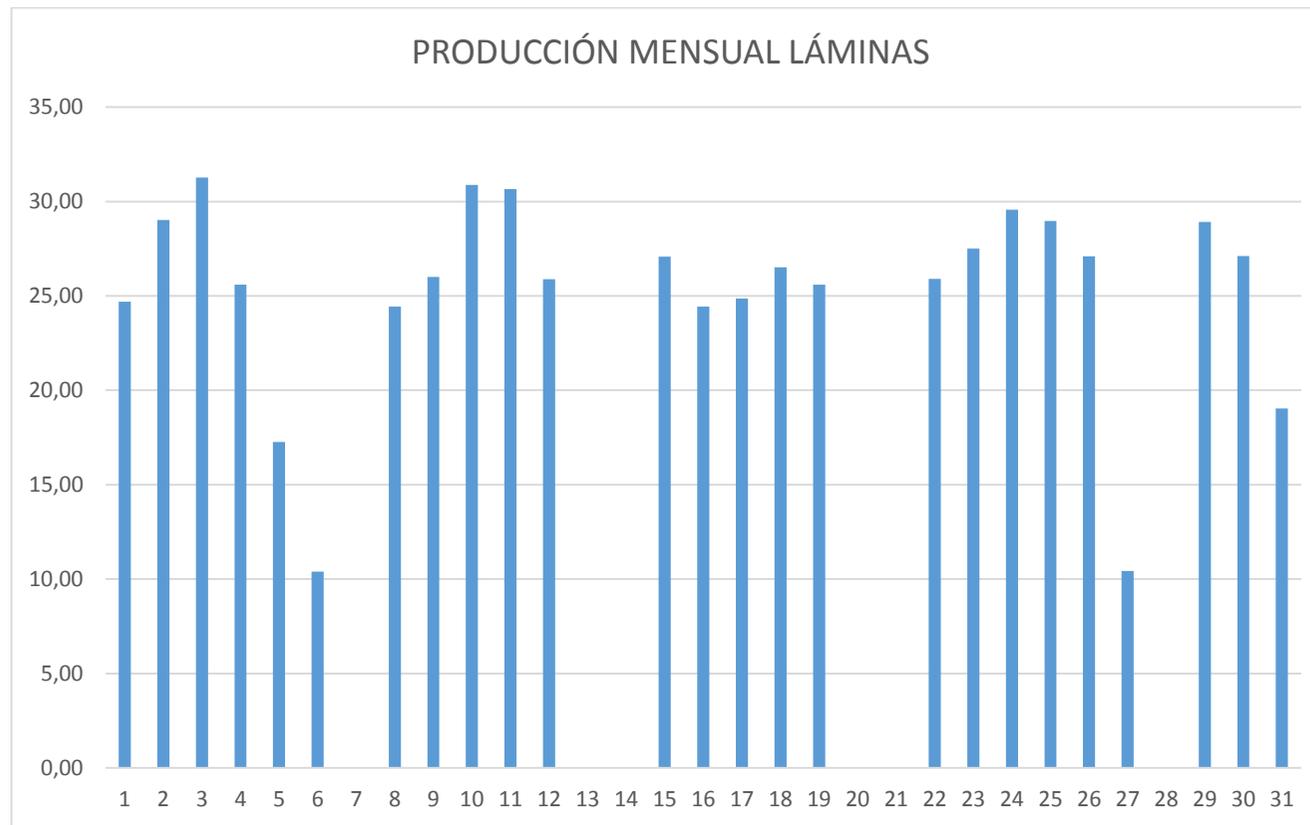
PRODUCCIÓN MENSUAL DE LÁMINAS – NOVIEMBRE 2016



Fuente: Arboriente S.A

ANEXO C

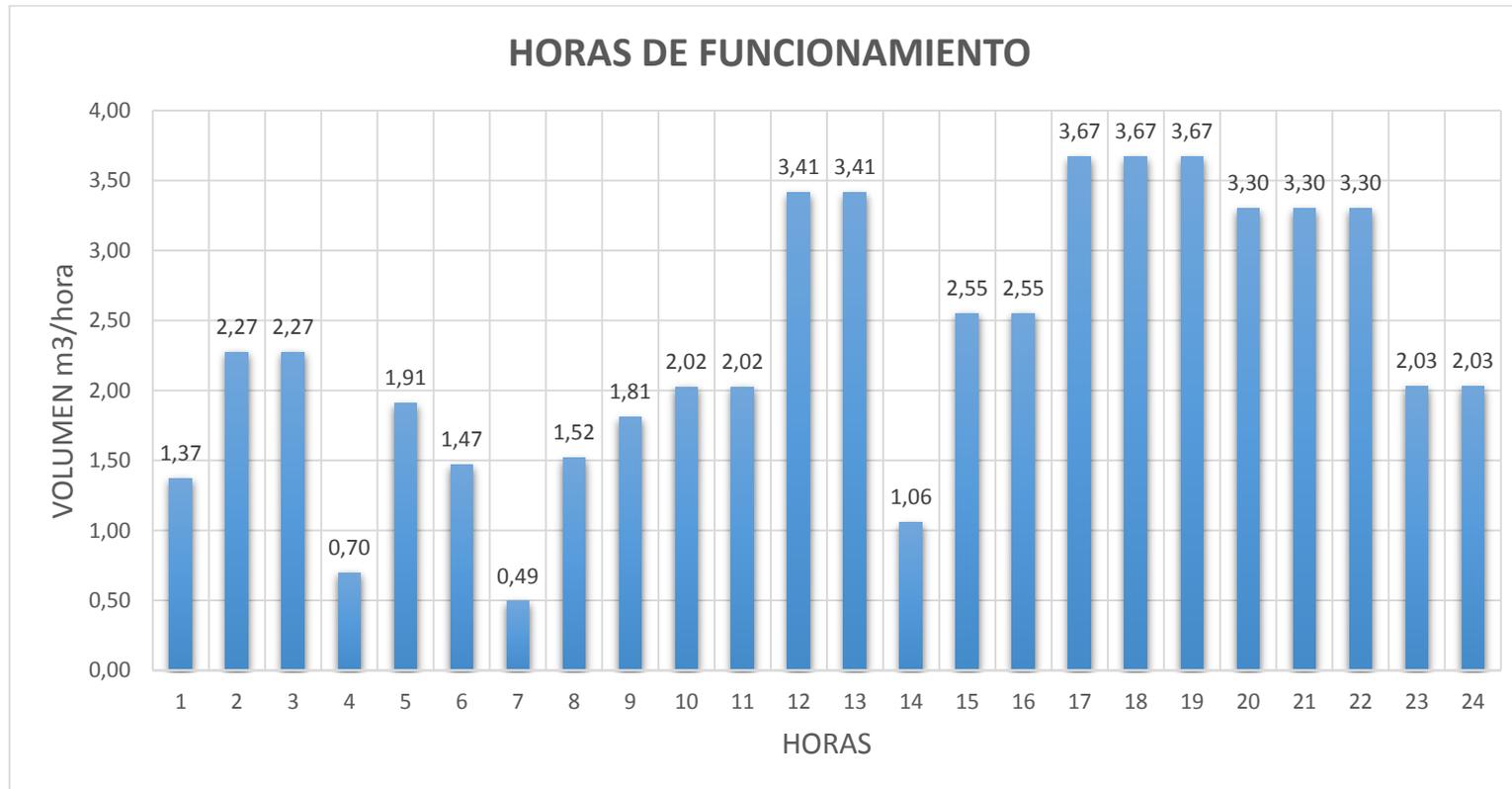
PRODUCCIÓN MENSUAL DE LÁMINAS – DICIEMBRE 2016



Fuente: Arboriente S.A

ANEXO D

PROMEDIO PRODUCCIÓN POR HORA DE OPERACIÓN



Fuente: Arboriente S.A

ANEXO E
SECADOR CONTINUO EMPRESA ARBORIENTE



Fuente: Autor

ANEXO F
CALDERO SUMINISTRADOR DE VAPOR



Fuente: Autor

ANEXO G

VENTILADOR – PARTE SUPERIOR CÁMARA DE SECADO



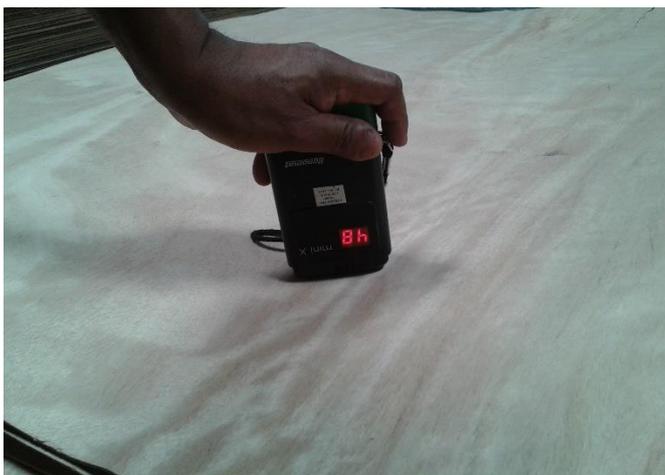
Fuente: Autor

ANEXO H
MEDICIÓN DE TEMPERATURAS



Fuente: Autor

ANEXO I
MEDICIÓN DE LA HUMEDAD DE LA MADERA



Fuente: Autor

ANEXO J

PROPIEDADES DEL AIRE A PRESIÓN ATMOSFÉRICA

T (°C)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^6$ (N·s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
-150	2.867	0.982	8.64	3.013	11.71	4.157	0.7246
-100	2.039	0.965	11.90	5.835	15.82	8.034	0.7263
-90	1.927	0.975	12.49	6.482	16.62	8.842	0.7330
-80	1.828	0.983	13.07	7.153	17.42	9.692	0.7381
-70	1.738	0.990	13.64	7.850	18.22	10.59	0.7414
-60	1.656	0.995	14.20	8.572	19.01	11.53	0.7433
-50	1.582	0.999	14.74	9.317	19.79	12.52	0.7440
-40	1.514	1.002	15.27	10.08	20.57	13.56	0.7436
-30	1.452	1.004	15.79	10.88	21.34	14.65	0.7425
-20	1.394	1.005	16.30	11.69	22.11	15.78	0.7408
-10	1.341	1.006	16.80	12.52	22.88	16.96	0.7387
0	1.292	1.006	17.29	13.38	23.64	18.17	0.7362
5	1.269	1.006	17.54	13.82	24.01	18.80	0.7350
10	1.247	1.006	17.78	14.26	24.39	19.44	0.7336
15	1.225	1.007	18.02	14.71	24.76	20.08	0.7323
20	1.204	1.007	18.25	15.16	25.14	20.74	0.7309
25	1.184	1.007	18.49	15.61	25.51	21.40	0.7296
30	1.164	1.007	18.72	16.08	25.88	22.08	0.7282
35	1.146	1.007	18.95	16.54	26.25	22.76	0.7268
40	1.117	1.007	19.18	17.02	26.62	23.45	0.7255
45	1.110	1.007	19.41	17.49	26.99	24.16	0.7241
50	1.092	1.007	19.63	17.97	27.35	24.87	0.7228
55	1.076	1.007	19.86	18.46	27.72	25.59	0.7215
60	1.060	1.007	20.08	18.95	28.08	26.31	0.7202
65	1.044	1.007	20.30	19.45	28.45	27.05	0.7190
70	1.029	1.007	20.52	19.95	28.81	27.79	0.7177
75	1.014	1.008	20.74	20.45	29.17	28.55	0.7166
80	0.999	1.008	20.96	20.97	29.53	29.31	0.7154
85	0.986	1.008	21.17	21.48	29.88	30.07	0.7143
90	0.972	1.008	21.39	22.00	30.24	30.85	0.7132
95	0.959	1.009	21.60	22.52	30.60	31.63	0.7121
100	0.946	1.009	21.81	23.05	30.95	32.42	0.7111

Fuente: Colección de Tablas, Gráficas y Ecuaciones de Transmisión de Calor.
Universidad de Sevilla

ANEXO K

CATÁLOGO TERMÓMETRO INFRARROJO



Termómetro sin contacto PCE-777

termómetro pequeño y compacto con puntero láser rojo
para la medición sin contacto, no destructiva de la temperatura de superficies

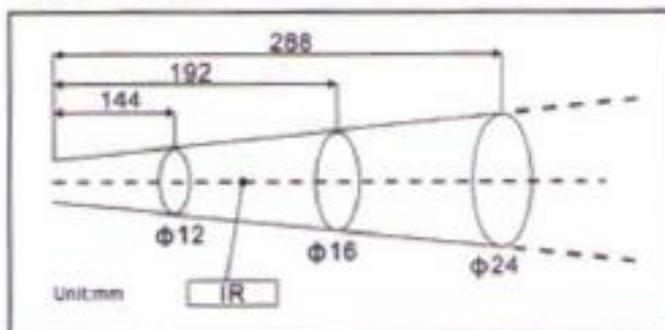
El termómetro sin contacto PCE-777 mide la temperatura de superficies mediante un rayo infrarrojo de forma no destructiva a larga distancia. Este termómetro sin contacto ligero se caracteriza por su manejo muy sencilla y la ayuda de enfoque rojo (rayo láser). De esta manera se puede enfocar precisamente la superficie y registrar la temperatura con el termómetro. El termómetro sin contacto es ideal para el uso en la industria y la artesanía, para el mantenimiento y reparación, por ejemplo en el área de calefacción, ventilación, aire acondicionado, automóviles, el control de equipos eléctricos y armarios eléctricos. El termómetro sin contacto PCE-777 se puede utilizar incluso en circunstancias más adversas y realiza mediciones de manera precisa. La iluminación de fondo de la pantalla del termómetro sin contacto se puede encender y apagar. El termómetro sin contacto dispone de una ayuda de enfoque para la medición de la temperatura sin contacto, precisa y rápida desde una distancia segura a objetos calientes o en movimiento o en áreas de medición difíciles de llegar. El valor de emisión del termómetro sin contacto está fijo en 0,95 lo que cubre el 90 % de todas las mediciones de temperatura. Si tiene más preguntas acerca del termómetro sin contacto, consulte los siguientes datos técnicos, utilice nuestro [formulario de contacto](#) o llámenos al: 902 044 604 para España, +34 967 543 695 para Latinoamérica e Internacional o en el +56 2 29381530 para Chile. Nuestros técnicos e Ingenieros le asesorarán con mucho gusto acerca del termómetro sin contacto o cualquier producto de nuestros [sistemas de regulación y control](#), de [equipos de laboratorio](#), de [instrumentos de medida](#) o [balanzas](#) de PCE Ibérica S.L.





- Rápida secuencia de medición
- Indicación del valor de medición en °C o °F
- Grado de emisión fijo
- Relación de punto de medición 12 : 1
- Desconexión automática
- Alimentación por batería
- Activación del puntero láser
- Construcción compacta y robusta

D:S=12:1



Presentación esquemática de la relación de punto de medición (12 : 1) del "termómetro sin contacto"

Especificaciones técnicas del termómetro sin contacto

Rango de medición de temperatura	-30 ... +330 °C -58 ... +626 °F
Resolución	0,1 °C
Rango espectral	8 ... 14 μm
Precisión	±4 °C (-50 ... 0 °C) ±2 °C (0 ... +330 °C)
Punto de medición (distancia en relación al tamaño del punto de medición)	12 : 1
Grado de emisión (fijo)	0,95
Puntero láser / visor láser	Visible solo un punto, potencia <1 mW, longitud de la onda 630...670 nm, clase II
Tiempo de respuesta	< 1 s
Desconexión automática	Después de 20 segundos de inactividad
Indicación sobre rango	"HI": indica exceso en el límite superior de





Condiciones ambientales

Alimentación

Dimensiones

Peso

temperatura
"LO": Indica exceso en el límite inferior de temperatura

Funcionamiento: 0 ... 50 °C, 10 ... 95 % H.r.
Almacenado: -20 ... +60 °C, <80 % H.r.

Batería 9 V

134 x 88,5 x 36 mm

145 g



Contenido del envío del termómetro sin contacto
1 x termómetro sin contacto PCE-777, 1 x batería, instrucciones de uso

Fuente: www.pce-iberica.es/instrumentos-de-medida/medidores/equipos-portatiles-medida.htm

PLANOS