

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA ACADÉMICA DE INGENIERÍA EN ENERGÍA



“GENERACION DE AIRE CALIENTE CON ASERRIN Y LA
OPTIMIZACION DE LOS INDICADORES DE DESEMPEÑO
ENERGETICO DE UN SECADOR PARA MADERA”

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO EN ENERGÍA**

AUTORES :

Bach. Pedro Luis Oliva Ascate

Bach. Edwin Renato Pumarica Peláez

ASESOR :

Mg. Robert Fabian Guevara Chinchayán

NUEVO CHIMBOTE, SETIEMBRE DEL 2021

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN ENERGÍA



CARTA DE CONFORMIDAD DEL ASESOR

La presente Tesis para Título ha sido revisada y desarrollada en cumplimiento del objetivo propuesto y reúne las condiciones formales y metodológicas, estando en cuadrado dentro de las áreas y líneas de investigación conforme al reglamento general para obtener el Título Profesional en la Universidad Nacional del Santa (R.D: N°492-2017-CU-R-UNS) de acuerdo a la denominación siguiente

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO EN
ENERGÍA

**“GENERACION DE AIRE CALIENTE CON ASERRIN Y LA OPTIMIZACION
DE LOS INDICADORES DE DESEMPEÑO ENERGETICO DE UN
SECADOR PARA MADERA”**

AUTORES :

Bach. Pedro Luis Oliva Ascate
Bach. Edwin Renato Pumarica Peláez

Mg. Robert Fabian Guevara Chinchayán
ASESOR

"Año del Bicentenario del Perú: 200 años de Independencia"

ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS

A los veinte días del mes de agosto del año dos mil veintiuno, siendo las siete horas de la noche, se reunieron en forma virtual a través de la aplicación zoom, el Jurado Evaluador designado mediante Resolución N°269-2021-UNS-CFI, integrado por los siguientes docentes:

- Mg. AMANCIO RAMIRO ROJAS FLORES : PRESIDENTE
- M.Sc. JULIO HIPOLITO NESTOR ESCATE RAVELLO : SECRETARIO
- Mg. ROBERT FABIAN GUEVARA CHINCHAYAN : INTEGRANTE

Para dar inicio a la sustentación y evaluación de la Tesis titulada: "GENERACION DE AIRE CALIENTE CON ASERRIN Y LA OPTIMIZACIÓN DE LOS INDICADORES DE DESEMPEÑO ENERGÉTICO DE UN SECADOR PARA MADERA", elaborada por el Bachiller de Ingeniería en Energía: PEDRO LUIS OLIVA ASCATE, con código de matrícula N° 0200211019, teniendo como asesor al docente Mg. Robert Fabián Guevara Chinchayan, designado mediante Resolución Decanal N° 374-2020-UNS-FI de fecha 09.11.2020.

Terminada la sustentación el Bachiller, respondió las preguntas formuladas por los miembros del jurado y el público presente.

El Jurado después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo y con las sugerencias pertinentes, en concordancia con el artículo 103° del Reglamento General de Grados y Títulos de la Universidad Nacional del Santa, declara:

BACHILLER	PROMEDIO	PONDERACIÓN
PEDRO LUIS OLIVA ASCATE	<i>Distovate (P)</i>	<i>Muy Buena</i>

Siendo las ocho horas del mismo día, se da por terminado el acto de sustentación, firmando los integrantes del jurado en señal de conformidad.

Mg. Amancio B. Rojas Flores
PRESIDENTE

M.Sc. Julio H. N. Escate Ravello
SECRETARIO

Mg. Robert F. Guevara Chinchayan
INTEGRANTE

"Año del Bicentenario del Perú: 200 años de Independencia"

ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS

A los veinte días del mes de agosto del año dos mil veintiuno, siendo las siete horas de la noche, se reunieron en forma virtual a través de la aplicación zoom, el Jurado Evaluador designado mediante Resolución N°260-2021-UNS-CFI, integrado por los siguientes docentes:

- **Mg. AMANCIO RAMIRO ROJAS FLORES** : PRESIDENTE
- **M.Sc. JULIO HIPOLITO NESTOR ESCATE RAVELLO** : SECRETARIO
- **Mg. ROBERT FABIAN GUEVARA CHINCHAYAN** : INTEGRANTE

Para dar inicio a la sustentación y evaluación de la Tesis titulada: "GENERACION DE AIRE CALIENTE CON ASERRIN Y LA OPTIMIZACIÓN DE LOS INDICADORES DE DESEMPEÑO ENERGÉTICO DE UN SECADOR PARA MADERA", elaborada por el Bachiller de Ingeniería en Energía: **EDWIN RENATO PUMARICA PELAEZ**, con código de matrícula N° 0199911057, teniendo como asesor al docente Mg. Robert Fabián Guevara Chinchayan, designado mediante Resolución Decanal N° 374-2020-UNS-FI de fecha 09.11.2020.

Terminada la sustentación el Bachiller, respondió las preguntas formuladas por los miembros del jurado y el público presente.

El Jurado después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo y con las sugerencias pertinentes, en concordancia con el artículo 103° del Reglamento General de Grados y Títulos de la Universidad Nacional del Santa, declara:

BACHILLER	PROMEDIO	PONDERACIÓN
EDWIN RENATO PUMARICA PELAEZ	8 (OCHO Y SIETE C/10)	80% BUENO

Siendo las ocho horas del mismo día, se da por terminado el acto de sustentación, firmando los integrantes del jurado en señal de conformidad.


Mg. Amancio R. Rojas Flores
PRESIDENTE


M.Sc. Julio H. N. Escate Ravello
SECRETARIO


Mg. Robert F. Guevara Chinchayan
INTEGRANTE



Digital Receipt

This receipt acknowledges that Turnitin received your paper. Below you will find the receipt information regarding your submission.

The first page of your submissions is displayed below.

Submission author: **Oliva Pumarica**
Assignment title: **tesis**
Submission title: **TESIS**
File name: **TESIS_OLIVA_PUMARICA.pdf**
File size: **2.01M**
Page count: **127**
Word count: **30,351**
Character count: **149,315**
Submission date: **23-Sep-2021 06:39AM (UTC-0500)**
Submission ID: **1655505082**



DEDICATORIA

A mis queridos padres
Crosby Oliva y Alcira Ascate
por su ejemplo de vida
Por su gran amor.

Y las enseñanzas de cada día.

A Dios por su gracia infinita y por ser nuestro guía
en nuestra carrera y la luz en nuestra vida.

P.L.O.A

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación está dedicado

A mi querida madre Norma por
su ejemplo e infinito amor.

Para Sheyla mi esposa y compañera de vida
por su amor y apoyo en este
proyecto de vida familiar.

Para mis hijos Fabricio y Sebastián
por ser mi motor todos los días
para seguir superándome.

A mi papa Braulio
siempre en mi corazón.

A Dios por su infinita misericordia
y por ser nuestro guía en nuestra carrera
y nuestra vida.

E.R.P.P

RECONOCIMIENTO

Al Mg. Robert Guevara
por su asesoría en el desarrollo
y culminación de esta tesis.

A la plana docente de la
E.P de Ingeniería en Energía
por su valiosa enseñanza.

Para mis compañeros de trabajo
Y mis colegas de la promoción 200 de la
Escuela de Ingeniería en Energía

Atentamente,

P.L.O.A

RECONOCIMIENTO

Mi sincero agradecimiento a todos los profesores de la escuela profesional de Ingeniería en Energía de la Universidad Nacional del Santa por sus concejos y aportes en la elaboración de nuestro proyecto de tesis, en especial al Mg. Robert Guevara, asesor de tesis.

A nuestra alma mater Universidad del Santa por abrirnos las puertas de su recinto académico y así podernos forjarnos como buenos profesionales en el devenir de la vida cotidiana.

Atentamente,

E.R.P.P

INDICE GENERAL

INDICE

RESUMEN

1.1	Realidad Problemática	1
1.2	Antecedentes	1
1.3	Justificación	4
1.4	Hipótesis	5
1.5	Objetivos	5
2.1	Secado de madera	7
2.2	Clasificación de secadores para madera	19
2.3	Caracterización del proceso de secado de madera	27
2.4	Madera como combustible	27
2.5	Estado del arte	39
2.6	Indicadores de desempeño energético	49
3.1	Material	51
3.2	Método	56
4.1	Condiciones actuales de secado de madera con aire caliente generado con gases de la combustión de petróleo BD5.	59
4.2	Aspectos constructivos y balance de energía en horno para aserrín.	67
4.3	Estado del Arte para la generación de aire caliente.	76
4.4	Balance de aire en el proceso de secado con aire caliente generado por combustión de aserrín.	79
4.5	Benchmarking entre indicadores de desempeño energético	83
4.6	Discusión de resultados	87
	Conclusiones	92
	Recomendaciones	94
	Referencias Bibliográficas	95
	Anexos	103

INDICE DE FIGURAS

Figura 01 Representación conceptual de los mecanismos de transferencia de calor: A. Convección; B. Conducción; C. Radiación.	09
Figura 02 Curva velocidad de secado de la madera	12
Figura 03 Pila de madera	14
Figura 04 Secador de madera	18
Figura 05 Secador de túnel progresivo	20
Figura 06 Secador convectivo	23
Figura 07 Secador de condensación para madera	24
Figura 08 Secador solar estático	25
Figura 09 Secador de vacío para madera	27
Figura 10 Psicrómetro básico	33
Figura 11 Capa límite en flujo laminar y turbulento	36
Figura 12 Distribución del flujo de aire caliente en una cámara de secado	37
Figura 13 Distribución de flujos para la generación de aire caliente diluido en Gases de la combustión	42
Figura 14 Distribución del horno para generación de aire caliente.	47
Figura 15 Disposición de temperaturas en proceso de secado de madera.	55
Figura 16 Balance de energía en Calor en Cámara de combustión convencional para generación de aire caliente	60
Figura 17 Apilado de la madera húmeda para el proceso de secado	63
Figura 18 Aspectos constructivos del horno para combustión de aserrín.	69
Figura 19 Aspectos constructivos de la parrilla para combustión del aserrín	70
Figura 20 Diseño final de tolvin de alimentación de aserrín	71
Figura 21 Vista de transportador helicoidal adaptado	74
Figura 22 Vista de ventilador de aire	77
Figura 23 Distribución de flujos aire entrante en chimenea del horno	79
Figura 24 Benchmarking entre IDE técnico 2.	83
Figura 25 Benchmarking entre IDE técnico 3.	84
Figura 26 Benchmarking entre IDE económico 1	85
Figura 27 Benchmarking entre IDE económico 2	86
Figura 28 Benchmarking entre IDE ambiental	87

INDICE DE TABLAS

Tabla 01 Contenido final de la humedad de las maderas de acuerdo a su empleo	16
Tabla 02 Características de residuos madereros	38
Tabla 03 Propiedades del aserrín de pino	39
Tabla 04 Poder calorífico experimental de especies forestales peruanas	52
Tabla 05 Especificaciones de Petróleo BD5	56
Tabla 06 datos de ingreso cámara de combustión convencional para generación de aire caliente	59
Tabla 07 Dimensiones de la Cámara de combustión convencional para generación de aire caliente	59
Tabla 08 Balance de energía en cámara de combustión convencional	61
Tabla 09 Duración del proceso de secado en función al flujo de aire caliente y 1 357 kg/h de gases de combustión a 800 °C	80

RESUMEN

El objetivo de la presente investigación es generar aire caliente con aserrín para optimizar los indicadores de desempeño energético de un secador para madera en la Empresa ORMEGU. Se cuenta además con una cámara de secado de capacidad de 26 880 kg de madera en la cual se seca desde una humedad de 25 % a 6 %. Del mismo modo se tiene un poder calorífico promedio del aserrín igual a 4 798 kcal/kg. En la presente investigación se plantea una investigación del tipo descriptiva, cuantitativo y no experimental, siendo la población y muestra única la Empresa ORMEGU. Se ha evaluado el desempeño del proceso de secado con aire caliente diluido con gases calientes provenientes de la combustión del Petróleo BD5 obteniéndose un periodo de tiempo de secado de 25,13 horas. Se dimensiono un horno con parrilla para la combustión de aserrín con un exceso de aire del 60 %, el cual seguidamente se mezcló con aire caliente obteniéndose un flujo de aire caliente a 180 °C, obteniéndose en el proceso de secado un tiempo de duración del batch de secado de 26,25 horas. Como conclusión principal se determinó un IDE técnico para la combustión de petróleo de 726 642 kcal/tonelada de agua evaporada, mientras que el indicador correspondiente asociado a la combustión de aserrín tiene un valor mayor igual a 4'980 300 kcal/tonelada de agua evaporada.

PALABRA CLAVE: Aserrín, Secador de madera, aire caliente.

ABSTRACT

The objective of this research is to generate hot air with sawdust to optimize the energy performance indicators of a wood dryer in the ORMEGU Company. It also has a drying chamber with a capacity of 26,880 kg of wood in which it is dried from a humidity from 25% to 6%. In the same way, there is an average calorific value of sawdust equal to 4 798 kcal / kg. In the present investigation, a descriptive, quantitative and non-experimental investigation is proposed, the population and the only sample being the ORMEGU Company. The performance of the drying process with hot air diluted with combustion gases from the combustion of the BD5 Petroleum has been evaluated, obtaining a drying time of 3.56 hours. A grate oven was designed for the combustion of sawdust with an excess of air of 60%, which was then mixed with hot air, obtaining a flow of hot air at 180 ° C, obtaining in the drying process a duration of 26.25 hour drying batch. As a main conclusion, a technical IDE for oil combustion of 726 642 kcal / ton of evaporated water was determined, while the corresponding indicator associated with the combustion of sawdust has a higher value equal to 4'980 300 kcal / ton of evaporated water.

KEYWORD: Sawdust, Wood dryer, hot air.

1.1 REALIDAD PROBLEMÁTICA

La madera es un material con propiedades elásticas, principalmente encontrado en los troncos de los árboles. El hombre lo utiliza mucho para diferentes procesos, ya sea en construcción, para hacer papel, carpintería, transporte, medicina, entre otras aplicaciones. Se tiene que poner un cuidado especial a la madera, ya que esta puede estar vulnerable a ciertos elementos que lo dañarían considerablemente, entre esos factores se encuentra la humedad, ésta podría corroer el material, aparte de que arrastra hongos y moho que sin duda son perjudiciales. En los talleres de trabajo para madera es aconsejable que se cuente con un ambiente apropiado. El proceso unitario de secado se realiza mediante la generación de aire caliente, mediante la combustión de petróleo BD5, el cual por ser un hidrocarburo que tiene los siguientes aspectos en su contra para su uso: reducción de las reservas de petróleo, alto costo y emisiones de gases de efecto invernadero.

En las empresas madereras se cuentan con un gran volumen de desechos, tal como lo es el aserrín, el cual, al ser un subproducto de la madera, tiene una gran capacidad para combustionar a diferencia de la madera en bloque. Aunque el calor producido con residuos de madera es inferior al procedente del petróleo o gas, su costo en comparación con los combustibles fósiles lo hace una fuente interesante de calor muy a mano o de calor y energía. A pesar de la creciente competencia que hay con los residuos para dedicarlos a otros usos, el aumento previsto en sus precios en los próximos años será indudablemente inferior al previsto para los combustibles tradicionales. Aunque la manipulación, elaboración y combustión de los residuos puede suponer un mayor desembolso de capital, los grandes avances que se han hecho en técnicas nuevas y mejoradas y en diseño de plantas están ahora convirtiéndolo en una fuente de combustible económicamente interesante.

1.2 ANTECEDENTES:

Se tienen los siguientes estudios que sirven como antecedente al presente informe de tesis:

En el artículo científico de Pastor y Limache (2017) titulada Utilización del aserrín como combustible de cocinas mejoradas en Pucallpa-Perú de la Escuela de Posgrado de la

Universidad Nacional de Ucayali, dentro de los resultados se muestran que las especies y el contenido de humedad influyen en la combustión del aserrín. El aserrín que combustiona mejor corresponde al shihuahuaco y la que combustiona poco a la catahua. Las dificultades que presentan el uso de aserrín en cocinas mejoradas son numerosas. No solo se produce por la mezcla de especies, sino que interviene otros factores. Entre estos factores se especifican los siguientes casos: De hecho, las propiedades físico – mecánicas de cada especie es específica. Al mezclarlos también las propiedades se mezclan. Al momento de la quema, estas propiedades se manifiestan, pues unos son ignífugos y otros no lo son por ello se obtiene una capacidad calórica variada, si por casualidad se mezcla aserrín de shihuahuaco entonces arderá, pero ésta no siempre ocurre.

Sedano (2006) en su tesis titulada “Diseño de un horno Bach para secar madera”, presentan las características de la madera que se va a secar en el horno y que determinan las consideraciones de dimensionamiento las condiciones del destino que se hará a la madera a secar, requerimientos del producto al que se destinará la madera. Del se realizan los cálculos en el proceso de horneado, las variaciones por psicrometría, el proceso de calentar el horno antes de su operación y el calor sensible necesario para el proceso con la finalidad determinar los circuitos de resistencia interna, externa y conductividad del material. El nivel de aislamiento es indispensable para amortiguar las pérdidas laterales, cubiertas, paredes entre otras las cuales cuantificadas suman cerca de 35 %.

Pinchi (2016) en su tesis “Caracterización del comportamiento del secado artificial de madera corta de la especie cumala (*Virola* sp.), en cámaras de aire caliente en la Industria Inversiones La Oroza S.R.L. Loreto – Perú” para optar el título de Ingeniero Forestal de la Universidad nacional de la amazonia en Perú, se planteó el objetivo de caracterizar el comportamiento de un programa de secado artificial mediante dos técnicas. En sus conclusiones el control de la temperatura se realiza en 11 etapas (1 de calentamiento, 9 de secado y 1 de enfriamiento), controlándose principalmente la temperatura de bulbo seco entre 55 a 70 °C y la temperatura de bulbo húmedo entre 45 a 55 °C, con un tiempo de 168 minutos. Concluye que el programa de secado para 1” de espesor de madera de dimensiones cortas es incluye un análisis de la humedad

final de 8% en 160 horas/7 días. El programa de secado para madera corta de 1" de espesor sugerido por el equipo de investigación para el estudio realizado permitió alcanzar una humedad relativa de propuesto por el estudio alcanzo una humedad final de 8% en 154 horas (cerca de 7 días). La eficiencia del secado artificial ejecutado por el centro de investigaciones de 98,25% de madera de alta calidad y también madera proveniente de operaciones de descarte.

Aguilar (2014) en su informe de tesis para optar por el título de Ingeniero Mecánico de la Universidad de las Fuerzas Armadas en Ecuador concluye lo siguiente: El diseño del sistema de ventilación en un horno de secado es poco convencional debido a que se inyecta aire caliente por la parte superior del horno, esto no quiere que se encuentre mal diseñado, sino que debido espació y fundamentos físicos utilizados se logró que su funcionamiento sea el adecuado. La extracción de aire por la parte superior del horno provoca que se disminuya la eficiencia de la cámara de secado debido a que el aire a mayor temperatura va a salir por dichas ventilas, las superiores. La selección de las ventilas de humidificación se dio de acuerdo a la dimensión de ductos que se tiene en el sistema, debido a que se requiere mantener la presión constante dentro del horno. Las ventilas de deshumidificación poseen cierta restricción al paso del flujo esto ayuda a que el aire se encierre dentro de la cámara y se enfríe lo suficiente para llegar al piso y poder salir.

Castillo (2005) en su tesis para optar el título de Ingeniero mecánico en la Escuela Politécnica del litoral de Ecuador concluye lo siguiente: Un secador debe ser capaz de resistir la acción del medio ambiente y las temperaturas que deberá soportar, además la humedad elevada, la expansión y la contracción causadas frecuentemente por los cambios de temperaturas y la acción de vapores ácidos que se desprenden de la madera al secarse. En el secado de madera intervienen las siguientes variables de control: Temperatura, Humedad y la Ventilación. En el diseño del secador intervienen: Selección del tipo de secador, Infraestructura de la cámara de secado, Sistema de calefacción y ventilación y Sistema de protección contra incendios. El factor más importante para la determinación de la cámara es la variedad de la especie de la madera y sus propiedades además de las condiciones estructurales.

Doerner (2009) en su informe para optar el título de Ingeniero Mecánico en la Universidad Austral de Chile concluye lo siguiente: Se dimensiono bajo ciertas restricciones la cámara de secado para un tipo de pino de clase radiata para una capacidad de 1 000 pulg., en el cual se controla la temperatura de bulbo seco, húmedo y humedad relativa dentro de la cámara del secador. Se desarrollaron las ecuaciones para la determinación de la capacidad calorífica necesaria para la deshidratación de la madera de pino radiata. El calor específico de la madera en condiciones de secado es 54 000 kcal/h. con lo cual se puede secar 1 000 pulgadas de madera corta. Los dispositivos y sistemas de control para la operación del secador se seleccionó con la condición de que pudiesen soportar condiciones extremas de temperatura y humedad dentro de ella. Además, se seleccionó un conjunto de serpentines de calefacción para brindar la energía termina con vapor saturado a 3,5 kg/cm², con lo cual la temperatura de residencia es de 80°C en el secador.

Cruz y Luna (2003) en su tesis para optar el título de Ingeniero en manejo de maderas de la Universidad Tecnológica Equinoccial de Ecuador concluye lo siguiente: el proceso unitario de secado para la madera, es muy rentable y eficaz a la intermedie o secado natural. Lo que permite demostrar que el proceso de secar hojas de laurel en el secador, mediante radiación solar, resulta muy eficaz, de tal modo que el tiempo de secado adquiere un mejor desempeño con relaciona al secado natural al aire libre. La variación del tiempo en el proceso de reducción del % de humedad, permite alcanzar valores de hasta 15 % . Se demostró que la eficiencia del secador solar es de hasta mas de con lo cual el proceso de absorción por la placa solar es muy superior a los valores estándar actuales en el orden de condiciones climáticas pueden ser del 7%, si esta eficiencia la comparamos con la de secado al aire libre que consigue superiores al 30 %, Para un secador solar es más bien técnicamente si la madera es de corte pequeño y su servicio auxiliar es novedoso.

1.3 JUSTIFICACIÓN

La justificación es la siguiente:

La urgencia de requerir un mejor desempeño y operatividad de la Empresa Maderera ORMEGU, la cual puede ser un modelo a tomar por el diverso de empresas dedicadas

al mismo rubro económico, que utilizan combustible Petróleo Biodiesel 5 para la generación de aire caliente, contando con residuos tal como el aserrín disponible para ser utilizado como combustible.

- Los altos costos del petróleo como hidrocarburo derivado del petróleo crudo, el cual se caracteriza por la volatilidad de los precios debido a la variación del precio de este combustible en el mercado internacional, el cual no puede ser regulado por el estado peruano.
- La posibilidad de emplear un combustible de mayor calidad y limpio (biomasa) en lo referente a su costo y generación de emisiones de efecto invernadero, tal como lo es el aserrín, el cual tiene por gas generado en su composición a óxidos de nitrógeno y en pequeño porcentaje de dióxido de carbono, y por lo consiguiente no tiene trazas de azufre.
- La oportunidad de poder mejorar los Indicadores energéticos de la Empresa debido al costo del aserrín por unidad de energía producida es más barato con relación al petróleo.

1.4 HIPÓTESIS

El efecto de la generación de aire caliente con aserrín optimiza los indicadores de desempeño energético en 5 % en la operación de un secador para madera.

1.5 OBJETIVOS:

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el desempeño de un generador de aire caliente con aserrín en la mejora de los indicadores energéticos en la operación de un secador para madera.

OBJETIVOS ESPECIFICOS:

- Realizar un balance de materia y energía en el Secador para Madera, teniendo en cuenta el sistema convencional de generación de aire caliente con biodiesel.
- Realizar el diseño energético de un sistema de calentamiento de aire teniendo como fuente de energía primaria aserrín.
- Evaluar el performance del sistema de generación de aire caliente con aserrín en la operación de secado de madera.

- Realizar un benchmarking entre indicadores de desempeño energético entre el sistema de secado original y el sistema de calentamiento de aire teniendo como fuente de energía primaria aserrín.

2.1 SECADO DE MADERA.

2.1.1 GENERALIDADES:

El secado se define como el proceso de retiro o remoción de humedad o sustancias volátiles contenidos dentro de una sustancia o materia para obtener un producto con una menor humedad con respecto a las condiciones iniciales. Es una operación unitaria en la que ocurre transmisión simultánea de calor y masa, la transferencia de energía (principalmente como energía calorífica) desde el medio circundante para evaporar la humedad de la superficie y la transferencia de la humedad interna hacia la superficie del sólido y su evaporación posterior. La remoción de agua en forma de vapor desde la superficie del sólido es función de las condiciones externas tales como la temperatura, flujo y humedad del aire, área de la superficie del material expuesta y presión mientras que el movimiento del agua a través del sólido depende de su composición física, la temperatura y su porcentaje de humedad (Espinoza, 2011)

El secado es una operación térmica que consiste en retirar parte de la humedad contenida dentro de una sustancia mediante la aplicación de una fuente de energía, generalmente las remociones de agua dependerán de las condiciones iniciales y finales del proceso de secado. (Geankoplis ,2006)

El secado se describe como el proceso de eliminación de sustancias volátiles (humedad) para producir un producto sólido y seco. La humedad se presenta como una solución líquida dentro del sólido, es decir; dentro de la microestructura del mismo. Cuando un sólido húmedo es sometido a secado térmico, dos procesos ocurrirán simultáneamente: Habrá transferencia de energía (comúnmente como energía calorífica) de los alrededores para evaporar la humedad de la superficie. (proceso 1) y habrá transferencia de la humedad interna hacia la superficie del sólido. (proceso 2). La velocidad a la cual el secado se ha efectuado es función de la velocidad a la cual los dos procesos, mencionados anteriormente, se llevan a cabo. La transferencia de energía, en forma de flujo de calor, se realiza desde los alrededores hacia el sólido húmedo y puede ocurrir como resultado de convección, conducción y/o radiación y en algunos casos se puede presentar una combinación de estos mecanismos de transferencia de calor. (Cabrera,2013)

Para el proceso 1, en la cual la remoción del agua contenida intramuscularmente en una determinada sustancia o materia, esto en forma de vapor saturado, dependerá fundamentalmente de condiciones de psicrometría tal como la temperatura de bulbo seco, humedad relativa y absoluta. Estas condiciones son de vital relevancia sobre en las primeras etapas del proceso de secado sobre todo cuando se inicia la remoción de humedad desde la parte superficial de la madera. Para ciertos materiales se puede generar un fenómeno de encogimiento, provocado por un exceso de temperatura en sus exteriores y sobre todo después de que la humedad inicial se ha conseguido retirar, lo que genera grandes gradientes de humedad desde el interior hacia la parte externa. Este fenómeno es provocado por el exceso de temperatura o calor y por lo tanto se genera altas tensiones dentro de la madera provocando grietas y deformación. (Cabrera, 2013)

Condiciones internas. La agitación de las moléculas de agua dentro de la estructura de la madera es función de la composición físico química interna de la madera. A partir de los mecanismos de intercambio de energía térmica hacia la parte humedad, se desarrolla un gradiente de temperatura en la parte interna de la madera mientras la evaporación que la humedad se remueve desde su superficie. La evaporación genera una remoción de la agua evaporada desde la parte interna hacia el exterior en las cuales se presentan otros fenómenos de transferencia de masa asociadas a ella tal como la difusión, flujo capilar, variación de presión interna causada por el encogimiento en el secador. (Cabrera, 2013)

La transferencia de energía puede ocurrir por convección, conducción o radiación, o en algunos casos por una combinación de ellos. En la Convección: El calor se transfiere al a la parte sólida que se encuentra secando a través de una ligera corriente de aire caliente que además de generar el flujo de calor para la evaporación del agua es también un agente transportador del agua removida desde el sólido. El principio general de la convección en el secado es el siguiente: un flujo de calor superficial es debido a la diferencia que existe entre la temperatura del medio secante y la temperatura de bulbo húmedo. El flujo de calor que sale de la superficie de la tabla es cuantificado por la conducción de calor en el producto y además por la energía interna del flux de humedad j que sale de la superficie. Cierta cantidad de calor será absorbida por el flujo de humedad. Una vez que la humedad en la superficie de la madera es evaporada, el término de calor latente de evaporización del agua es eliminado. (Sandoval, 2008)

En la conducción, el calor de evaporación se proporciona a través de superficies calentadas (en reposo o en movimiento) colocadas directamente con el material a secar. El calentamiento de estas superficies se realiza normalmente mediante vapor. El agua evaporada se elimina mediante una operación de vacío o a través de una corriente de gas cuya función principal es la de eliminar agua. (Espinoza, 2011)

La transferencia de calor al interior de una tabla de madera es dada por conducción, teniendo como parámetro motor el gradiente de temperatura que se desarrolla a lo largo del espesor de la tabla. El cambio de la energía interna en un volumen de control en un lapso de tiempo es representado por dos términos: la rapidez neta de calor transportado hacia adentro del volumen de control debido a la conducción, y la rapidez a la cual el calor es transportado fuera del volumen de control debido al flujo másico. (Sandoval, 2008)

Radiación: Es el mecanismo de transferencia de calor a través de un medio en la cual las ondas de naturaleza electromagnéticas se transmisión a través del espacio en una determinada longitud de onda. Se caracteriza por ser una transferencia de energía radiante que permite evaporar la humedad del producto. La energía es absorbida selectivamente por las moléculas de agua, mientras el producto se seca o deshidrata, requiere un menor flujo de energía. Incluye varias fuentes de radiación electromagnética con longitudes de onda desde el espectro solar hasta microondas (0,2 m –0,2 mm). Dentro de esta categoría se incluye el infrarrojo. (Espinoza, 2011)

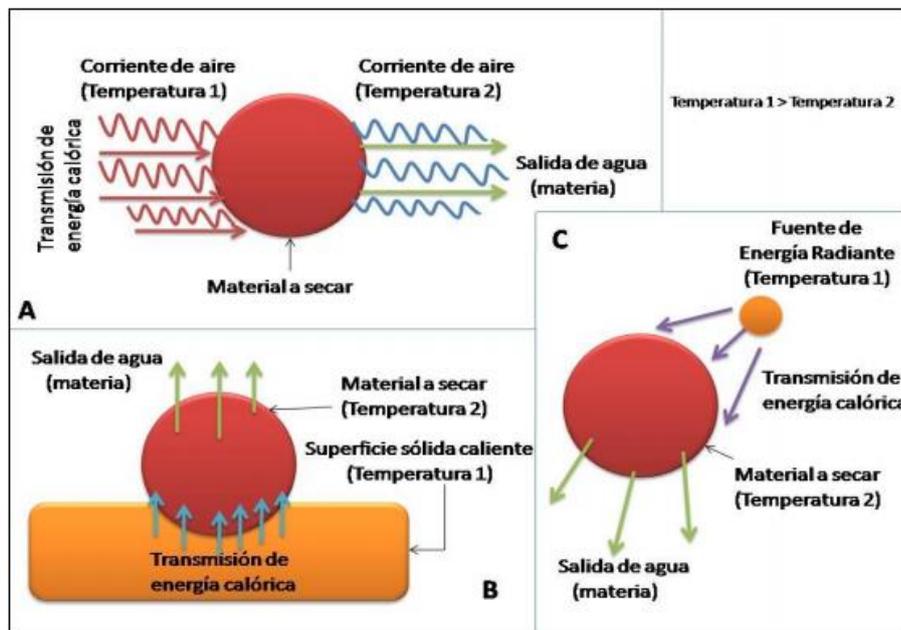


Figura 01 Representación conceptual de los mecanismos de transferencia de calor: A. Convección; B. Conducción; C. Radiación.

Fuente: Espinoza (2011)

La humedad juega un papel preponderante en el proceso de secado así tenemos lo siguiente:

Humedad inicial. Es el contenido de agua evaporada contenida en la madera o existente en la materia a secar y se representa como la fracción de vapor de agua evaporable que se encuentra en un producto, se expresa en función a la masa total o seca (esto es la masa que se produce descontando la masa de agua evaporada que contiene). En los cálculos del secador se emplean para expresar el grado de humedad contenido. (Moreno, 2017)

Humedad de equilibrio. En el secado de materia solida es necesario identificar los materiales higroscópicos de los no higroscópicos. Un material higroscópico realiza la acción de absorber y retener un porcentaje de la humedad cuando se tiene ciertas condiciones climáticas en el entorno. La humedad retenida se denomina humedad del equilibrio, cuando al encontrarse en equilibrio térmico con la humedad contenida en el aire atmosférico. El porcentaje de humedad de equilibrio de un sólido es de relevancia conocer en la desecación, debido a que es un contenido de humedad límite para condiciones básicas de humedad y temperatura atmosférica. (Moreno,2017)

Humedad libre Se refiere a la humedad representativa con respecto al aire en ciertas condiciones y representa la diferencia entre la humedad de la materia sólida y la humedad de equilibrio con el aire en las condiciones estándar. Es decir, representa la humedad que perderá el sólido luego de entrar en contacto con aire en condiciones dadas y constantes un determinado tiempo, y es función de la humedad del sólido como de la humedad relativa del aire húmedo. (Moreno,2017)

Humedad crítica Referida la cantidad de humedad de aquella materia en estado de equilibrio con la presión de parcial del agua en el aire húmedo. Es el contenido de humedad que tiene el producto a deshidratar en el momento de producirse una transición con la velocidad de secado. El contenido crítico de la humedad se inicia o identifica cuando la intensidad es constante y empieza a disminuir la intensidad de la desecación en la madera dentro del secador. (Moreno, 2017)

Velocidad constante de secado: El área externa contiene humedad, la remoción del vapor de agua se genera en esa zona, en este periodo del proceso se lleva a cabo la difusión del vapor del agua en la interfase aire/humedad y se realiza a través de una velocidad en la superficie por difusión. Cerca de terminar este periodo la humedad se ha removido en un periodo constante, y transportada desde el centro de la materia hacia el exterior debido a fuerzas de tensión y capilares, la película de humedad sobre la superficie se reduce más allá del secado se evapora y el proceso es controlable de las resistencias externas. (Cabrera,2013)

Velocidad decreciente de secado: La velocidad con la cual la humedad pasa a través de la materia sólida se presenta debido al alto grado de concentración con gradientes entre las partes más internas y externas de la materia a secar. La profundidad promedio del nivel de humedad aumenta significativamente y así mismo la conductividad de calor de las zonas externas secas es escasa mientras que la velocidad del proceso de secado se ve afectada por la conducción de calor. El producto seco tiene una densidad muy elevada y presenta una cavidad pequeña con poros microscópicos. El secado se afecta por la conducción de calor debido a la alta resistencia por difusión dentro de la madera. Debido a que la concentración de humedad se reduce por el secado, la velocidad de traslación de la humedad interna decrece. (Cabrera,2013)

La velocidad de secado se define como la pérdida de humedad de la materia o producto a secar por unidad de tiempo, matemáticamente se representa por la siguiente diferencial ($-dX/d\theta$) cuando se tiene condiciones permanentes en el proceso tal como TBH, TBS, presión, humedad relativa y absoluta y velocidad, todas invariables en el tiempo. Esta última expresión permite conocer a profundidad conocer el mecanismo de secado en estado transitorio y la disipación de calor en todas sus dimensiones. Por lo general se aprecian dos partes particulares en la curva de comportamiento del proceso de secado: una etapa de régimen constante y otra de caída de régimen, es un comportamiento teórico con un alto grado de aproximación a situaciones reales. (Hidalgo, 2013)

La cinética del proceso de secar distinto tipo de madera nos permite visualizar la evolución temporal de la humedad contenida en la madera e identificar la magnitud de la velocidad del secado referente al tiempo o la humedad contenida en la madera, son las cinéticas del secado más reconocidas. La velocidad del secado Φ de la madera puede ser representada por 3 etapas de secado de forma teórica, con variación de calor sensible, latente y sensible.

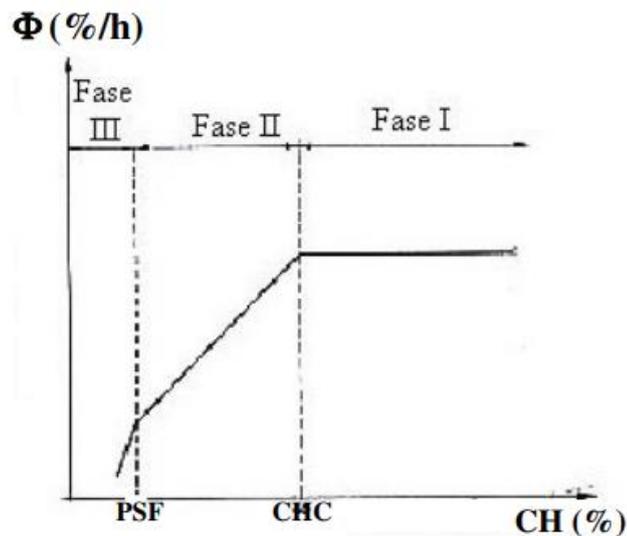


Figura 02 Curva velocidad de secado de la madera

Fuente: Vallejos (2003)

La I etapa (Fase inicial) del secado se realiza en el momento de que el contenido de humedad presente se comienza a remover a una velocidad constante, dependiente de las

condiciones ambientales de temperatura y humedad. La temperatura del aire T produce la elevación de la velocidad de evaporación del vapor de agua en la superficie de la madera y por lo tanto genera un flujo interno de agua evaporada dentro de la madera. El desplazamiento del aire y su velocidad de secado perimétrica facilitan la remoción del aire húmedo, entrando en contacto las superficies de la madera con el aire de secado a una temperatura superior a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Por otra parte, la humedad relativa representa el grado de saturación del aire húmedo debido a la acción del aire caliente circulante. (Vallejos, 2003)

En esta fase se tienen mecanismos de transferencia de calor y masa así como de evaporación superficial, es decir, la evaporación se genera en la parte externa de la madera y el flujo de calor se emplea en la evaporación del agua contenida en la madera. La temperatura y la presión de vapor en la parte superficial corresponden al TBH y la presión de saturación, así mismo el movimiento interno del agua líquida alcanza la superficie externa de la madera, generándose la evaporación. En esta fase de condición constante donde se evapora. Esta etapa constante finaliza cuando aparecen zonas secas en la superficie de la madera. El contenido de humedad en esta condición se denomina contenido de humedad crítico, donde más allá de este punto la temperatura de la superficie de la madera tiende a ser la temperatura del ambiente. La II etapa (Fase II), este se refiere al secado con velocidad decreciente en la cual, al tener un periodo de tiempo mayor con respecto al resto de etapas, la cantidad de agua evaporada generada es mucho menor en proporción al agua retirada con respecto al total de la masa contenida en la madera por secar. La madera muchas veces presenta ciertas zonas de su superficie externa una valor de la presión de vapor inferior al valor de la presión de saturación a condiciones normales, mientras cuando la presión de vapor se reduce, entonces la temperatura incrementa su valor con valores muy altos con respecto al valor de TBH de la I etapa. (Vallejos, 2003)

La velocidad de secado por unidad de superficie total, se reduce de manera lineal hasta un periodo en el cual la parte externa de la madera se seca hasta los valores requeridos, en este estado se presentan 02 zonas definidas donde la remoción del agua esta caracterizada por la difusión de vapor y el agua saturada. (Vallejos, 2003)

2.1.2 SECADO DE MADERA.

La madera es un recurso natural de amplio uso sobre todo en el sector construcción, por lo cual requiere un valor de humedad debajo del valor luego del secado natural. Uno de los métodos de mayor uso para el proceso de secado permite tener una humedad final en valores por debajo de un 15%, y se realiza a través de una cámara de secado con una corriente de aire caliente circulante. Se efectúa dentro de una cámara cerrada con un medio calefactor que suministra el valor energético que permita la remoción progresiva de la humedad. El flujo de aire es forzado a través de impulsores a baja presión, los cuales circulan a través de las pilas de madera. La cámara de secado deberá ser hermética, de materiales, con un buen nivel de aislamiento, resistentes a la oxidación galvánica y que pueda soportar altas temperaturas de proceso. Las temperaturas empleadas varían desde los 60°C hasta más de 120°C, y las velocidades del aire está en el orden de 1 a 7m/s, lo que dependerá del tipo de secador o cámara de secado a usar. (Doerner, 2007)

El secado natural de madera consiste en primero apilar la madera dentro de un espacio abierto sobre tabloncillos, dispuestas de tal manera que el aire a temperatura ambiental circule a través de la madera por convección natural en sentido longitudinal, transversalmente a la dirección del viento principal. La pila de madera debe tener una altura adecuada para su maniobrabilidad segura.

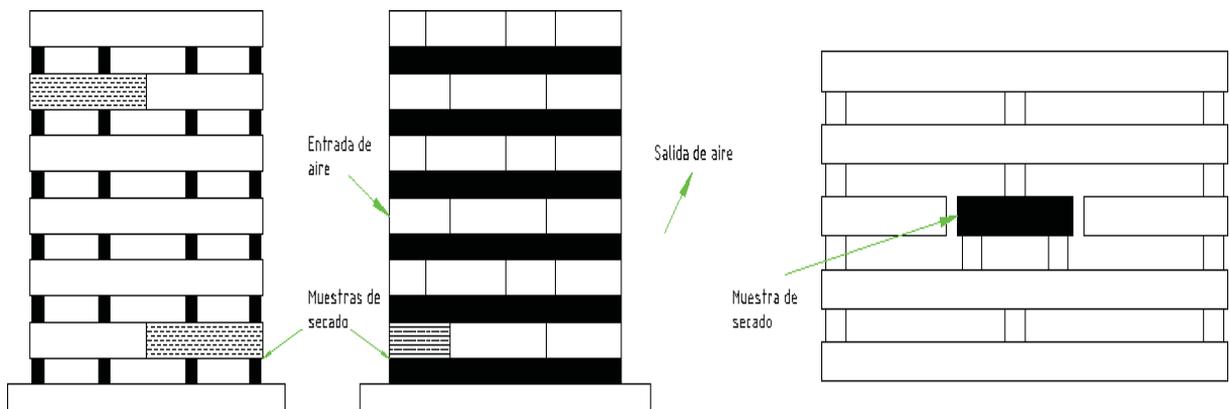


Figura 03 Pila de madera

Fuente: Collago & Criollo (2013)

Durante el secado natural, según el tipo de madera debe estar apilada adecuadamente, por el cual las diversas clases de madera puedan secarse lentamente. El ambiente debe

estar libre de tierra vegetal y recubierto de arena gruesa, grava con la finalidad de evitar la absorción de la humedad de la tierra por la madera. Los desperdicios de la madera y deberán ser retirados para evitar su deterioro por hongos u otros agentes microbianos. Este secado natural puede durar largos periodos de tiempo, e incluso hasta 7 meses, con la finalidad de obtenerse una humedad final cercana a 30% y dependerá del tipo de madera. El uso de la madera en muebles requieren tener una humedad entre 6 a 8%, con lo cual el secado natural no es idóneo para el secado de madera para fabricar muebles. (Collago & Criollo, 2013)

Dentro de las ventajas del secado natural tenemos:

- Es un método de bajo costo de inversión.
- Posee un bajo costo operación.
- No se requiere de mano de obra especializada. (Collago & Criollo, 2013)

Dentro de las desventajas del secado natural se tiene:

- Un largo periodo de secado.
- Se presentan defectos en la madera tal como agrietamientos.
- Las estaciones influyen negativamente en el proceso.
- Se produce degradación por ataque de insectos.
- Existen costos asociados al uso del tipo de terreno,
- Por lo general es un método muy caro para el secado por el largo periodo de tiempo. (Collago & Criollo, 2013)

El método de Secado artificial permite la remoción del vapor de agua mediante un control de temperatura, humedad y ventilación. El secado artificial se practica dentro de espacios cerrados, herméticos conocidos como cámaras de secado, por donde el flujo de aire caliente a una temperatura entre 100 a 180°C cede su calor sensible provocando la remoción de la humedad. En este proceso se aumenta la temperatura interior calentando el aire, empleando ventiladores se hace recircular el aire caliente a través de una pila de madera, calentandose la madera y en función a un gradiente de temperatura se produce el secado. (Contreras, 2017)

El proceso de secado artificial, deberá garantizar que las propiedades químicas y físicas específicas, tal como: valor de humedad predefinido para no causar daños en la calidad de la madera secada, del mismo modo debe cuidarse del deterioro microbiano y de insectos xilófagos. Este método presenta ventajas como lo son: disminución del tiempo del proceso de secado y un menor riesgo de rajaduras y agrietamientos de la madera. Por estas razones el secado artificial de madera es una de las técnicas de mayor importancia en el proceso de preparación de la madera para la manufactura, tendiente a obtener productos finales con alta calidad para su maquinabilidad y trabajado. Presenta algunas limitaciones tal como una elevada inversión por la cantidad de equipamiento a instalar en puesta en marcha, elevados costos de operación por el empleo de combustibles fósiles como petróleo BD5 , tiene una reducida disponibilidad de mano de obra calificada para operar los equipos y complejos sistemas de control de humedad de la madera, de temperatura y humedad relativa dentro de la cámara de secado. (Contreras, 2017)

El secado artificial presenta diversos niveles de contenido de humedad en función a las diversas calidades finales de madera, así en la Tabla 01 se presenta el contenido final de humedad para diversos tipos de madera y sus diferentes usos.

Tabla 01 Contenido final de la humedad de las maderas de acuerdo a su empleo

Usos	Porcentaje de humedad
Envases para frutas	20 %
Muebles en general	10 %
Pisos-parquet	10 %
Cabos y mangos para herramientas	9 %
Instrumentos musicales	8 %
Reglas-escuadras	7 %
Construcciones navales	12 %
Tornería	12 %
Madera compensada	6 %

Fuente: Cite Madera (2019)

Cuando se realiza el secado artificial de madera en secadores convencionales se tienen etapas definidas en el proceso de secado, que son aplicables de manera común a todo tipo de madera tal como:

Etapas de calentamiento: En esta etapa deberá cumplirse con 02 objetivos, el primero será alcanzar las condiciones de temperatura y humedad relativa del aire contenido en la cámara del secador y el segundo es tener un valor homogéneo de la temperatura de toda la carga de madera, así como el contenido de humedad final de toda la madera.

Etapas de secado: En esta etapa se tiene como objetivos alcanzar el contenido de humedad requerido en un menor tiempo posible y obtener el contenido final homogéneo en toda la carga y presentar un mínimo de defectos. (Espinoza, 2017)

Etapas de Post – secado: En esta etapa se realizan tres tratamientos:

- Tratamiento de Igualización con el objeto de homogenizar el contenido de humedad de la madera en su totalidad. El tratamiento se iniciará cuando la tabla más seca tiene 2% de contenido de humedad menos que el contenido de humedad final deseado y termina cuando la tabla de mayor humedad alcanzara el contenido de humedad final deseado. La humedad de equilibrio debe ser igual al contenido de humedad de la tabla más seca.
- Tratamiento de Acondicionamiento que tiene 05 objetivos, reducir o eliminar las tensiones esfuerzos generados por el secado entre la superficie y el interior de la madera y homogeniza el contenido de humedad en todo el espesor de la pieza.
- Tratamiento de enfriamiento en donde al finalizar el proceso y realizado los tratamientos anteriores, se deberá enfriar la madera en el interior de la misma cámara para prevenir el riesgo de la presencia de tensiones generadas por el secado. (Espinoza, 2017)

El secado en cámaras u hogares térmicos ofrecen grandes ventajas, tal como la reducción del tiempo de secado en 7 a 20 días y permite una humedad más homogénea. El secado artificial de la madera se realiza en ambientes cerrados con circulación de aire, por lo general son ambientes completamente metálicos, de acero o de aluminio, con paredes y techos con protección calorífica (lana mineral) con un bajo coeficiente de transmisión térmica. Los secadores, son de diversos tamaños y formas, llevan instalaciones o equipos

para la circulación del aire y sistemas de control y regulación de la humedad, temperatura y circulación del aire para un proceso de secado optimo.

En el proceso de secado artificial, se deben tomar en cuenta las operaciones previas al secado, las operaciones del mismo proceso de secado y el monitoreo y control durante el proceso de secado de la madera. Se señalan cada una de estas operaciones.

- a) Acciones previas al proceso de secado.
 - Inspección del lote.
 - Selección de tablas por espesor y largo.
 - Emparrillado o apilado.
 - Colocación de testigos.
 - Traslado de rumas.
 - Elección del programa de secado.
- b) Etapas y operaciones del proceso de secado.
 - Llenado y colocación de testigos en secadero.
 - Acondicionamiento inicial.
 - Calentamiento.
 - Secado.
 - Acondicionamiento final.
 - Enfriamiento. (Cite MADERA,2019)



Figura 04 Secador de madera

Fuente: SECAMAD Instalaciones técnicas de secado.

2.1.3 SECADORES DE MADERA.

El proceso de secado es una operación unitaria la cual se retira la humedad contenida en una sustancia o materia a secar. La cámara del secador es el ambiente cerrado por lo general donde se realiza el proceso de secado. Son cámaras aisladas, fabricadas de materiales que tienen un buen aislamiento térmico, para tener la menor cantidad de pérdidas de energía calorífica, deben ser muy resistentes a la corrosión galvánica, ya que la madera se liberan ácidos durante el proceso de secado. La cámara de secado debe tener una estructura resistente, formada por paneles laterales, los que son de la altura de la cámara. Las caras laterales de estos paneles se fabrican con chapas galvanizadas o de chapas de aluminio. (Doerner, 2007)

Estos equipos térmicos industriales son en esencia: instalación calefactora, ductos de aspersión, motoventilador axial o centrífugo, válvulas de entrada de flujo de aire desde el exterior y salida, equipos de medición y control para la regulación del proceso de secado. Un sistema de aspersión permite rociar la cámara de secado con vapor de agua y calentar el aire. Ambos equipos permiten lograr una humedad relativa del aire requerida según la necesidad en el proceso de secado. (Coyago & Criollo, 2013)

Mediante el motoventilador se produce la corriente de aire que fluye de forma forzada por medio de las pilas donde se ubican las maderas a secar. Los equipos de entrada y salida de aire permiten extraer la humedad donde el aire húmedo se encuentra saturado de vapor de agua y del mismo modo permite un flujo de aire fresco en la cámara de combustión como aire de renovación. En el proceso de secado el agua se condensa en las paredes interiores de la cámara de secado y se vierten al exterior a través de canaletas especiales hacia el exterior. El proceso dependerá del tipo de madera, espesor, humedad inicial del proceso, tiempo de residencia, humedad inicial y humedad final requerida. Las maderas de alta dureza presentan un grado de complejidad durante el secado por lo cual requieren mayores periodos de residencia en el proceso o de permanencia en el cuerpo del secador. La perfección del proceso se consigue con un control adecuado de las variables para lo cual los procesos de control juegan un papel relevante. Los secadores modernos operan de modo semiautomático o automáticamente, que simplifica el proceso, consiguiéndose adecuados desempeños. (Coyago & Criollo, 2013)

Según el plan de secado, la madera pasa por cinco fases: calentamiento del aire del secador, el calentamiento de la madera que se encuentra en el secador, el proceso de desecación mediante el suministro de aire de entrada caliente y la aspersion del vapor o humectación, el acondicionamiento, o sea la homogenización de la humedad final, y el enfriamiento lento. (Coyago & Criollo, 2013)

2.2 CLASIFICACION DE SECADORES PARA MADERA.

2.2.1 SEGÚN LA CARGA.

Los secadores convencionales son dispositivos térmicos conformados por: Cámara de secado, Sistema para precalentamiento del aire, sistema de humidificación, ventilador para circulación forzada de aire, instrumentos para regulación y control de las variables físicas y de condiciones ambientales. Existen una variedad de secadores convencionales y se clasifican según su distribución y funcionamiento, clasificándose en:

a) Secador de Túnel o Progresivos.

Referente al túnel de secado, este permitirá un proceso continuo mediante el cual la madera sale del túnel y se reemplaza por madera húmeda que ingresa por una puerta lateral a la salida de la cámara de secado. El aire circula en contracorriente al desplazamiento de la madera. Los secadores del tipo continuos son túneles de aproximadamente hasta 50 metros de largo en los cuales se disponen, elementos de calefacción y ventiladores ubicados sobre un techo de cielo raso; el retiro y renovación de aire se efectúan a través de chimeneas. En aquellos túneles de menor longitud por lo general se tiene un solo ventilador en el extremo que suministra el aire de proceso. En este tipo de horno resulta difícil lograr un control adecuado y homogéneo de la temperatura y la humedad relativa sobre la longitud del túnel. Tan solo las condiciones del aire a la entrada son de fácil control de manera exacta, de tal forma que un mejor control de las condiciones del aire en los túneles largos, se realiza con sistemas por medio de persianas se puede dar un mejor bifurcación y sentido del flujo de aire. Se agregan equipos iniciales que permiten el precalentamiento de la madera por medio del aire húmedo y caliente que son evacuados por las chimeneas del túnel y, además se tiene una sección de acondicionamiento con su propio sistema de circulación del aire y temperatura. Los túneles de secado continuo representan una alternativa de solución adecuada

cuando se dispone de una gran cantidad de madera del mismo tipo y calidad de ingreso y con las mismas características, debido a que se trata de un sistema de secado limitado en su control difícil de adaptarse a una producción compuesta por maderas de diferente calidad. (Bonilla, 2015)



Figura 05 Secador de túnel progresivo

Fuente: Empresa Xinzhou

b) Secador tipo Compartimiento o Estáticos.

Para este tipo de secador la madera se acopia en forma de hileras o pilas de madera dentro de la cámara de secado o dentro de un horno de tal forma que permite la circulación interna entre los puntos de apilado y la circulación del personal que labora. La carga de madera permanece fija o estática según su apilado a diferencia del horno continuo. Son los más utilizados en nuestro medio. Los secadores convencionales operan a temperaturas de bulbo seco de 40°C hasta 80°C al inicio del proceso de secado y del 70°C a 95°C al final del secado. La velocidad del aire está en el rango de 1,5 m/s a 2,5 m/s. El tiempo de residencia dura entre 6 a 10 días para conseguir una humedad final requerida en el rango de 18% a 20% . La cámara del secador debe tener el diseño y características y componentes de un secador y estará diseñado y adaptado para soportar temperaturas extremas que puedan alcanzarse en el proceso e incluso superiores a 100 °C en caso de un gradiente excesivo de temperatura. La opción optima es de colocar ventiladores axiales en la parte superior y separados uno de otros a una determinada distancia de las pilas de madera. En el caso de que la cámara tenga un ancho mayor de 2.5 metros, se

recomienda emplear ventiladores reversibles con posibilidad de invertir el sentido del flujo a través de variadores de velocidad que puedan invertir el sentido del flujo del aire a través de la pila de madera. (Bonilla, 2015)

Los secadores tradicionales tienen un sistema de humidificación del aire con la finalidad de poder evitar la presencia de temperaturas relativamente altas que pueden alcanzarse, de tal manera que deterioren la madera al propiciar sobre estas una excesiva remoción de humedad o la extracción de la humedad de manera muy rápida. Los sistemas de humidificación utilizados son el mismo vapor producido por los calderines de aire caliente, que se inyecta de forma directa sobre la cámara de secado, o la inyección de agua fría pulverizada por medio de un aspersor. En general, el sistema de humidificación del aire se ubica luego del sistema de calentamiento, en el sentido de flujo del aire. Finalmente, la variación de humedad relativa HR del aire dentro del secador se consigue mediante un sistema de control de evacuación del aire que se sitúan en la zona de presión cerca de los ventiladores. Las chimeneas de admisión de aire se colocan en la zona de succión de los ventiladores. (Bonilla, 2015)

Las ventajas de tener secadores convencionales radican en el empleo de fuentes de calor baratas y de fácil obtención, la posibilidad del acondicionamiento de la madera y el tiempo de residencia empleado durante el proceso de secado. Las desventajas de estos equipos térmicos son básicamente el mantenimiento especializado del generador de calor o caldera, el tratamiento químico del agua; cierta dificultad para controlar la humedad relativa del aire, que depende de las condiciones ambientales, existe posibilidad de generarse defectos en la madera debido a las altas temperaturas; y así como la necesidad de renovar el aire, proceso en el cual hay pérdidas de calor hasta de un 70% por concepto de calentamiento del aire ambiente de renovación. (Bonilla, 2015)

2.2.2 SEGÚN FUENTE DE ENERGIA.

Los sistemas más usados de secado artificial son: convección, condensación, solar, radio frecuencia, y al vacío, cada tipo de secador tiene sus ventajas y desventajas y la utilización de estos depende de las necesidades de cada empresa.

a) Secador de convección.

El secador de convección a la fecha es el más utilizados por las factorías y aserraderos, en este tipo de sistema se intercambia el aire en estado de saturación de agua con aire fresco, por lo cual los secadores que utilizan este sistema tienen salidas para el aire húmedo y entradas para el aire seco, este tipo de secadores trabajan a temperaturas elevadas normalmente de 60 a 90 °C, en este tipo de sistema se pueden usar quemadores a diésel o de gas para la generación de energía calorífica, también se emplea la quema de desperdicios de madera siendo esta una de la forma más económica. (Coyago & Criollo, 2013)

Ventilador. (1)

Ventilas regulables para intercambio de aire. (2)

Intercambiador de calor. (3)

Sistema de humectación. (4)

Sistema de mando y control. (5)

Madera a secarse. (6)

Cámara de secado. (7)

Coches de alimentación. (8)

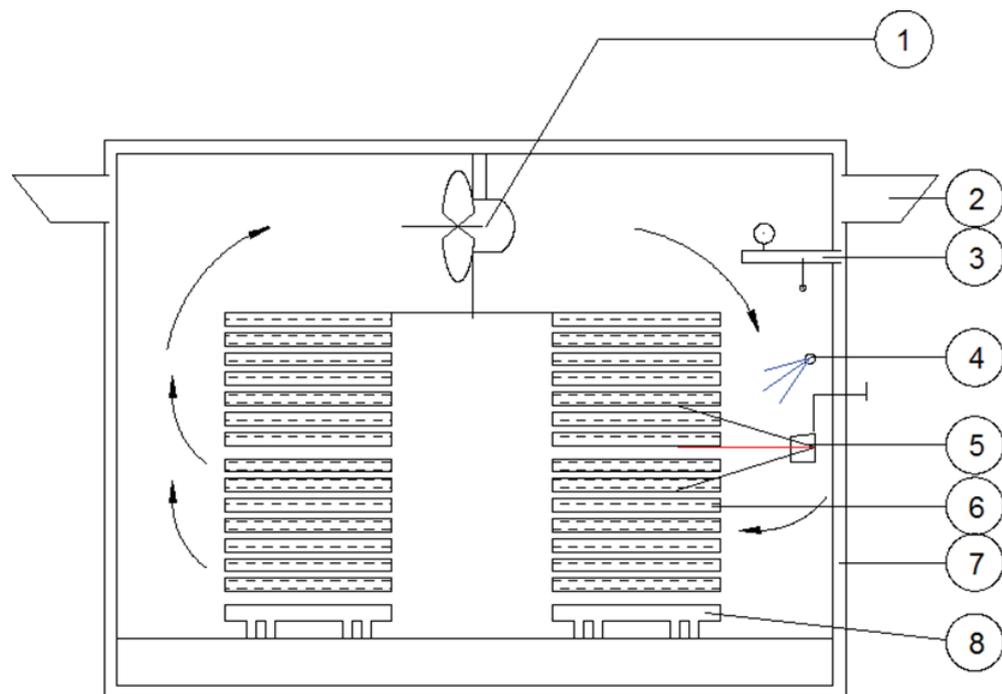


Figura 06 Secador convectivo

Fuente: Criollo & Coyago (2013)

Dentro de las ventajas de los secadores de convección tenemos que son sistemas que hacen uso de tecnología avanzada en el control y regulación del aire, con lo cual puede dar una calidad muy buena de madera si son proporcionados con un método de control bueno y tiene un bajo costo operación.

Dentro de las desventajas de los secadores de convección tenemos que: conta de un exceso de aire adicional, con lo cual se genera un adicional de energía para tal fin. (Coyago & Criollo, 2013)

b) Secador de condensación.

Los deshumidificadores o secadores de condensación son aparatos térmicos que operan de manera similar a una maquina refrigeradora que representa la parte fundamental de la unidad del proceso de secado. Está compuesto de 04b elementos , entre los cuales fluye un fluido refrigerante tal como el R12 o R22 en un sistema de refrigeración por compresión de vapor. (Bonilla, 2015)

En un deshumidificador, el circuito de aire de secado húmedo ingresa por la parte inferior, entrando en contacto con un evaporador frío. El aire de secado cede en esta operación el agua que contiene se condensa. De esta manera el aire seco entra en contacto con el condensador, calentandose, con lo cual antes de regresar utilizando un conjunto de resistencias eléctricas que se sitúan en la parte en la parte frontal del ventilador que impulsa aire a través de la unidad de calentamiento. El aire impulsado circula por maquina refrigeradora donde se le purga o condensa el agua contenida, la cual es retirada a través de una canaleta al exterior del secador. Del mismo modo el aire se calienta y retorna a la cámara para desarrollar un nuevo ciclo a través de la madera apilada. El deshumidificador recicla entonces el mismo aire de secado y no precisa de ventilas o rejillas para intercambio de aire con el exterior; no obstante, algunos de estos equipos tienen forma de intercambiar aire con el exterior, lo cual funciona de forma similar a un secador convencional. (Bonilla, 2015)

Los deshumidificadores operan a valores de temperatura bajas. Este proceso se inicia con un período de precalentamiento hasta una temperatura de 25°C en un

tiempo de 3 a 4 horas; posteriormente el proceso de secado de madera verde que contiene entre 25% a 30% de contenido de humedad se desarrolla a valores de 25°C y 50°C. Puesto que la temperatura y la humedad relativa del aire húmedo son controlables, en los deshumidificadores se cuantifica la eficiencia en términos de una capacidad precisa de remoción de agua de la madera, es decir, desde una velocidad de secado que suele ser entre el 2% y el 3% de reducción diaria del contenido de humedad de la madera. (Bonilla, 2015)



Figura 07 Secador de condensación para madera

Fuente: Powder Tronic.

c) Secador solar.

Los secadores solares son cámaras que presentan la particularidad de almacenar el calor generado debido a la incidencia de los rayos solares sobre un colector o acumulador térmico de tal forma que el calor generado sea útil en el proceso de secado de la madera (Salas, 2008).

Un secador solar de madera está dividido en 02 partes: la primera contiene al colector de energía solar, impulsores, rejillas y difusores para el desvío del aire caliente, siendo la responsable de que el aire incremente su temperatura y la segunda es el área de apilado de la madera que se requiere secar. Su funcionamiento se inicia en el momento que la radiación solar incide sobre el colector solar, este último tiene la capacidad de captar la energía solar y convertirla

en energía térmica útil que permite incrementar el valor del calor sensible del aire que se encuentra en el interior del secador. (Contreras, 2017)

Con la ayuda de un ventilador de tiro forzado y un sistema de ductos de desvío, se distribuye el aire caliente a una velocidad moderada comparada a otros sistemas, esto hace que la humedad relativa del producto disminuya y la del aire aumente hasta que sea necesario la renovación del aire que pueda mantener un gradiente de humedad y asegure la continuidad del proceso de secado. (Contreras, 2017)

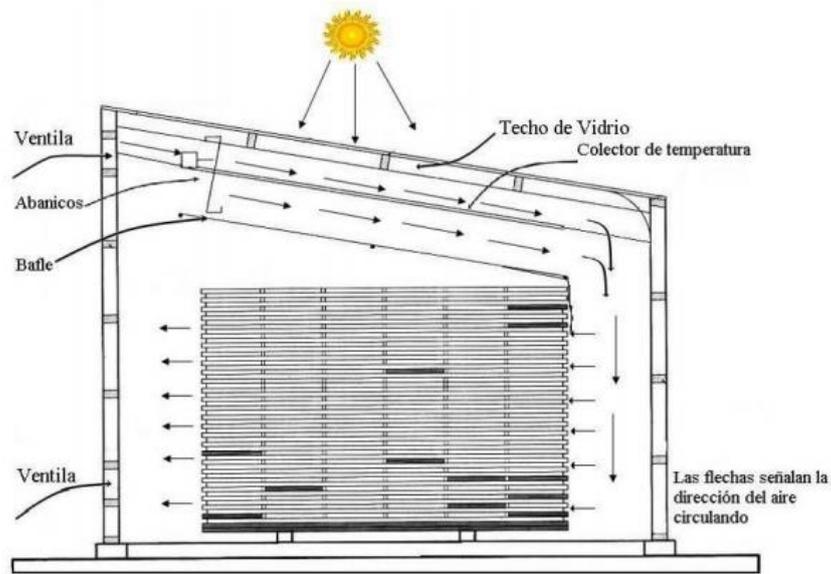


Figura 08 Secador solar estático

Fuente: Tesis de Contreras (2017).

d) Secador de radio frecuencia.

Este equipo térmico se emplea en el secado de pequeños lotes de madera operando bajo el principio de la radio frecuencia, de forma análoga a la operación de un horno microondas. Las células con el agua son obligadas a vibrar con un valor de alta frecuencia. El calentamiento de una masa inducido por microondas es el resultado de la agitación de tipo molecular que sufren los dipolos de las moléculas del agua al estar expuestas de manera directa a un campo alterno de ondas de alta frecuencia, de tal manera en un horno a microondas, el material húmedo se calienta con velocidad y de forma uniforme en toda su extensión, mientras que la parte externa se ve sometida a una remoción de agua y posteriormente esta superficie se enfría progresivamente. Las temperaturas más altas, mientras que las

temperaturas más bajas se producen en la parte superficial. Esta distribución de temperaturas es contraria a la producida por los secadores convectivos. (Contreras, 2017)

e) Secador al vacío.

El secado al vacío se presenta como alternativa para las pymes y cuando la carga a calentar es pequeña. Este tipo de secador tiene la geometría cilíndrica o tubular de acero, conteniendo un cierre hermético, con el cual la depresión o vacío generado no es alterado. En este equipo al reducirse el valor de la presión atmosférica se reduce la temperatura de ebullición del agua y disminuye notablemente la resistencia del agua al pasar por la madera, esto provoca una aceleración del proceso de secado del agua en la madera. El calentamiento de la madera a secar se realiza mediante planchas de aluminio con calentamiento mediante agua o vapor, existe casos en el cual se utiliza aire caliente para calentar la madera, realizándose en equipos de secado al vacío de forma cíclica. (Contreras, 2017)

El aire calienta la madera apilada en el cuerpo del secador sobre los coches de alimentación, durante esta etapa la madera no se llega a secar completamente, tan solo se calienta hasta una temperatura de secado y se prepara para la segunda fase, en esta fase se conecta la bomba de vacío la cual genera la depresión interna succionando el aire húmedo de la madera y produciendo la reducción de la temperatura de ebullición del agua a presiones menores. En el interior de la madera se concentra en ese instante el valor de la mayor temperatura con respecto al valor de la superficie de la misma, evaporándose, este proceso se repite continuamente hasta lograr la humedad final requerida de la madera. (Contreras, 2017)



Figura 09 Secador de vacío para madera

Fuente: Empresa WTM Vaglio

2.3 CARACTERIZACION DEL PROCESO DE SECADO DE MADERA.

2.3.1 MADERA.

Está conformado por un conjunto de tejidos orgánicos tal como la masa de los troncos de los árboles, libres de corteza y también de hojas. La madera, como parte fundamental del tronco de los árboles tiene la función de sostenimiento de las ramas y son el medio de transporte de sus alimentos. Esto le confiere al material, características muy particulares tal como la porosidad (espacios vacíos) y así mismo una alta resistencia mecánica en relación con su peso, lo que da lugar a que sus propiedades se manifiesten en diferentes magnitudes según como se corte la madera o habilite. La madera se compone de : Carbono 50%, Hidrógeno 6%, Oxígeno 43%, Nitrógeno 1%, Cenizas 0,5%. Los componentes orgánicos son: la Celulosa (50 %) la cual es un hidrato de carbono semejante al almidón. Lignina (25 %) el cual es un derivado del fenil-propano el cual le proporciona una gran dureza y protección; Hemicelulosa (25 %): que une las fibras entre si. Y otros componentes tal como resinas, Grasas, Sustancias incombustibles. (Hidalgo,2013)

La Madera aserrada son 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. 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. (Hernández, 2017)

Según el tipo de madera, añejidad del árbol, lugar donde proviene, clima, las propiedades varían, pero de manera general, las maderas presentan las siguientes características:

- a) Baja densidad: Son menos densas que el agua (lo que produce el empuje hidrostático para la flotación). La madera es un excelente aislante térmico (casas de madera en países nórdicos). Las maderas contienen una gran proporción de agua.
- b) Presentan una alta resistencia mecánica, ante esfuerzos por tracción, compresión, flexión, cortadura, desgaste. Es muy resistente al esfuerzo de tracción (estiramiento) y con fuerte resistencia a la compresión o aplastamiento.
- c) Hendibilidad: Esta referido a la facilidad con lo cual las fibrillas de madera se abren en sentido longitudinal. Hienden peor las maderas duras, las secas, las resinosas y con nudos. La madera hendible no es apta para el clavado y para realizar encajes. Si el secado es muy violento la madera tiende a abrirse. (Hidalgo, 2013)
- d) Retractabilidad o contracción: Pérdida de volumen al perder parte del agua.
- e) Humedad: Cantidad de agua que tiene la madera en su estructura. Está relacionada con su peso y afecta a otras propiedades físicas y mecánicas. Elemento que se debe reducir para obtener una madera útil, desde un punto de vista tecnológico.
- f) Dureza: Es la resistencia que ofrece al corte. Aumenta con la densidad.
- g) Flexibilidad: Característica de las maderas jóvenes, verdes y blandas, que admiten ser dobladas sin romperse.
- h) Características estéticas: Color, veteado, olor. (Hidalgo, 2013)

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. A continuación, se detallan algunas de ellas:

- i) **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.
- j) **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. (Hernández, 2017)
- k) **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.
- l) **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. (Hernández, 2017)

2.3.2 PARAMETROS DE SECADO DE LA MADERA.

La madera es un material orgánico celular poroso, por lo tanto reviste la importancia de conocer la cantidad de sustancia sólida que forman las paredes, por lo que indica que a mayor cantidad de material sólida tenga dicho tipo de madera, sus propiedades mecánicas serán mucho mejores en relación a maderas porosas. Con lo consiguiente las características de trabajo serán mejores y en cuanto a su secado, tendrá un comportamiento estable gracias a sus propiedades eléctricas y en tal caso a sus propiedades térmicas que ayudaran a evacuar rápidamente el agua que se encuentra en la madera, debido a la cantidad de humedad que tenga. La densidad en la madera se

define como la masa por unidad de volumen a un determinado contenido de humedad. (Coyago & Criollo, 2013)

La densidad se obtiene en función a los cálculos que se derivan de la siguiente fórmula para la determinación de la densidad absoluta:

$$D = \frac{M}{V} \dots \dots \dots (1)$$

En el cual:

D representa la densidad de la madera en kg/m³

M es la masa de una fracción de madera con una determinada humedad.

V es el volumen del elemento con igual contenido de humedad.

Las investigaciones efectuadas han determinado que en el caso de que la humedad aumenta, trae consigo un aumento en la proporción de su masa, lo que le da una mayor posibilidad de masa a ser trabajada con respecto al volumen que ocupa. Esto indica que la densidad aumenta de forma directamente proporcional al incremento de la humedad. En función de que el punto de saturación de las fibras, el incremento de la densidad es mayor, debido a la estabilidad del volumen de la madera, por cuanto se considera que por encima del punto de saturación de las fibras el fenómeno de hinchamiento de la madera se detiene y la madera ya no sufre una expansión en todo su volumen. Estos cambios y variaciones del volumen y la masa de la madera debido al contenido de humedad, se pueden determinar por efectos de comparación según la siguiente expresión. (Coyago & Criollo, 2013)

$$DA = \frac{m_0}{V_0} \dots \dots \dots (2)$$

DA es la densidad anhidra.

M₀ = masa seca al horno,

V₀ = volumen seco al horno,

La densidad relativa para la madera es el cociente entre la densidad de la madera y la densidad del agua. Numéricamente es igual al cociente entre la masa de la madera y la masa del agua desplazada en la masa de la misma pieza de madera. En términos de física la densidad se basa tanto en el volumen como en la masa, con el mismo contenido de humedad, en el campo de la investigación suele asumirse los datos de la madera seca al horno y el volumen con un cierto contenido de humedad.

Matemáticamente la densidad relativa se expresa a través de la siguiente fórmula matemática según el criterio señalado por la SIAU en 1984:

$$DR = \frac{M_o}{V * D_a} \dots \dots \dots (3)$$

DR = Densidad Relativa

M_o = Masa seca al horno, en gramos.

V = volumen a un determinado contenido de humedad.

D_a = Densidad del agua en condiciones normales = 1,0g/cm³

Relación entre Densidad y Densidad Relativa. Una relación entre la densidad y la densidad relativa de la madera puede derivarse de la siguiente fórmula matemática:

$$CH = \frac{m - m_o}{m_o} * 100 \% \dots \dots \dots (4)$$

donde:

CH = Contenido de humedad en porcentaje.

M = Masa con un cierto contenido de humedad o masa inicial

M_o = Masa seca al horno.

Máximo Contenido Posible de Agua. En el caso de que una pieza de madera este totalmente sumergida en agua, el valor del contenido de humedad será representado por la cantidad de agua gireoscópica, fijada en un 30%, más la cantidad de agua libre localizada dentro de los poros. Según Coyago & Criollo (2013), matemáticamente el valor del contenido de agua máximo se determina con la siguiente fórmula:

$$CH_{\text{maximo}} = 0,3 + \frac{1,5 - DA}{1,54DA} \dots \dots (5)$$

En el proceso de secado con estufa, así como en el secado natural al aire libre, el agua contenida en la madera se remueve hacia la superficie por evaporación. La velocidad de evaporación del agua contenida en la madera es controlada por la temperatura, la humedad del medio ambiente y la velocidad del flujo de aire que circula a través de la pila de madera a secar. Para entender el proceso de secado de la madera es muy importante un conocimiento profundo de los principios de la evaporación molecular y las relaciones existentes entre las diversas variables físicas de control y regulación del proceso. El propósito es analizar los procesos termodinámicos y los mecanismos de transferencia de calor necesarios para efectuar un adecuado y óptimo proceso de secado, y de esta manera determinar las distintas relaciones numéricas que existen entre los procesos de secado. (Arbelez & Feria,2003)

El calor es la fuente de energía que proporciona a las moléculas de agua de la madera la obtención de la energía interna y energía cinética necesaria para la evaporación. La velocidad de la evaporación es función de la cantidad de energía calorífica suministrada por unidad de tiempo también conocida como potencia térmica suministrada y de la capacidad del medio donde se genera la evaporación (aire), para poder absorber la humedad liberada durante el proceso de secado por la madera. Según lo anterior podemos concluir, que la temperatura permite incrementar la aceleración de la evaporación o deshumidificación, ya que, cuanto más elevada sea la temperatura del ambiente que rodea la madera, más intensa será la evaporación generada, puesto que el aire puede absorber una mayor cantidad de agua o humedad. (Arbelez & Feria,2003)

En el interior de la madera, la temperatura condiciona la velocidad del movimiento del agua, incrementando considerablemente la circulación debido al aumento del valor de la temperatura de proceso. De tal forma a 60°C la velocidad de flujo del agua dentro de la madera es aproximadamente 4 o 5 veces mayor que a 18 °C. Esto se puede observar en el proceso de secado dentro de una estufa o calefactor doméstico, en el cual la energía o calor se transmite por convección natural o forzada según el caso, siendo este mecanismo de transferencia de calor el predominante durante el proceso. Esta es la razón del efecto

que podría generar una diferencia significativa entre la temperatura del aire en circulación y la temperatura de la superficie de la madera, prácticamente se anula durante el secado en cámaras convencionales, por cuanto con este proceso en la cámara se elimina la radiación, que es una de las causas de deterioro en la madera. En el secado natural o al aire libre, cuando la madera está expuesta a la radiación solar, la temperatura superficial de la madera es muy superior a la temperatura del aire en circulación. Esta situación genera ciertas características en el secado muy severas, que se manifiestan con defectos en la madera tal como torceduras, grietas, rajaduras en los casos extremos, etc. (Arbelez & Feria,2003)

Hay que tener en cuenta que la temperatura y la humedad relativa del aire son factores decisivos para el secado, ya que estos elementos determinan el clima dentro de la cámara junto con el equilibrio que brinda el contenido de humedad de la madera. El control de la temperatura constituye un factor muy importante para muchas especies de madera, como, por ejemplo, para maderas livianas la temperatura máxima alcanza los 70 a 90°C para una buena calidad del secado; para maderas semipesados su temperatura puede ser entre 60 a 80°C, y para maderas verdes y recién aserradas con un contenido de humedad del 30% se deben secar a bajas temperaturas para evitar que se colapse la madera. (Arbelez & Feria,2003)

La temperatura de bulbo seco es aquella temperatura que se registra dentro de un termómetro convencional en donde el bulbo se mantiene completamente seco. La temperatura de bulbo húmedo, es aquel valor de la temperatura que marca un termómetro cuyo bulbo este recubierto de una porción de algodón humedecido en agua, y además sobre el algodón debe existir una ligera corriente de aire para generar la saturación. En forma general el termómetro seco y húmedo se conoce como psicrómetro, y las mediciones realizadas con los termómetros permiten la humedad relativa del aire de tablas, humedad absoluta, entalpia y volumen específico del aire humedo (Coyago & Criollo,2013)

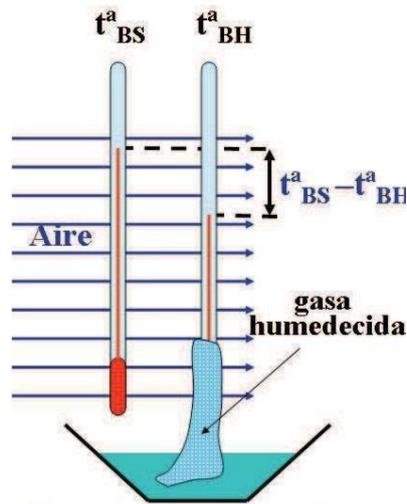


Figura 10 Psicrómetro básico

Fuente: Coyago & Criollo (2013)

Humedad específica del aire: El aire atmosférico es una mezcla de aire seco y vapor de agua contenida en la atmosfera, si se tiene cuenta con una determinada masa de aire atmosférica entones, la humedad específica del aire es la relación existente entre la masa del vapor de agua y la masa del aire seco que contiene la masa del aire atmosférico, se le conoce como relación de la humedad (X), ccuando el aire no contiene vapor de agua se le conoce como aire seco y su humedad específica es cero, si la cantidad de vapor aumenta la humedad específica aumentará hasta que el aire no pueda contener más humedad en este contenida en la atmosfera punto se dice que el aire está saturado de humedad. (Coyago & Criollo,2013)

$$X = \frac{M_v}{M_a} \dots \dots \dots (6)$$

Donde:

M_v Masa de vapor de agua (kg)

M_a Masa de aire seco (kg)

La humedad relativa es la determinada temperatura del aire ambiente que contiene una determinada cantidad de masa de vapor de agua, en estas condiciones también se puede seguir suministrando el vapor de agua hasta que el aire se sature. La humedad relativa

del aire es la cantidad de vapor de agua que contiene con respecto a la cantidad máxima de vapor de agua que pueda contenerse a la misma temperatura. (Coyago & Criollo,2013)

La definición de presión Parcial y presión de Vapor Saturado, se detalla cuando el aire atmosférico (mezcla de aire seco y vapor de agua), está conformado por distintos gases y cada uno de estos contribuye al peso total del mismo. De manera similar cada gas que compone el aire atmosférico ejerce una presión parcial individual de modo que la sumatoria de estas presiones equivale a la presión total, según la ley de Dalton. Formalmente el vapor de agua es un componente del aire atmosférico. Este ejercerá una presión individual o parcial (presión parcial de vapor), en el aire. Tomar en cuenta que, debido a la composición uniforme e inquebrantable del aire, el mismo se considera como un gas ideal (no una mezcla de gases), y a esta composición, sin tomar en cuenta, la cantidad de vapor de agua que este contenga, se le llama aire seco. (Narváez, 2014)

El porcentaje de humedad en el aire atmosférico determina el valor de presión parcial de vapor. Mediante este valor se puede obtener la presión de vapor saturado, que es la presión a la que se encuentra cierto volumen de aire, a cierta temperatura, cuando su contenido de humedad es 100%. Esto se logra cuando las moléculas de agua en forma de vapor y líquido están en equilibrio, es decir que la cantidad de moléculas que se evaporan es igual a la cantidad de moléculas que se condensan. A través de la presión de vapor se puede obtener la humedad absoluta (X), que es la relación entre masa de agua por unidad de volumen de aire húmedo. Esta relación se obtiene suponiendo que el aire sea un gas ideal, nos dice que el vapor de agua se puede considerar un gas ideal si la presión parcial no excede 10 kPa. (Cengel, 2002)

$$P_v * V = n * R * T \dots \dots (7)$$

Dónde:

P_v = presión de vapor saturado.

V = volumen de la cámara de secado.

n = número de moles (masa de vapor (m_v)/peso molecular agua.

R = constante universal de los gases ideales.

T = temperatura de la cámara de secado.

La velocidad del aire circulante dentro del horno es de vital importancia por dos cosas; La primera, debido a que es la forma por medio del cual el mecanismo de transferencia de calor por convección se realiza, que ayuda a la evaporación del agua, en la madera. Además, permite eliminar el exceso de humedad y mantener las condiciones deseadas. La capa límite, esta referida al límite entre dos flujos diferentes. Par un régimen de flujo laminar la transferencia de calor es mucho menor que la transferencia de calor para un flujo turbulento. Un flujo turbulento desarrollado resulta con una mayor eficacia que el laminar, debido a que el flujo turbulento de la capa límite es más amplia. (Narváez, 2014)

Según la (Junta del acuerdo de Cartagena, 1989), se demostró experimentalmente, que se pueden obtener resultados de óptimas condiciones de secado, en la mayor parte de los casos, cuando el aire circula a través de la pila de madera a una velocidad a 2 m/s.

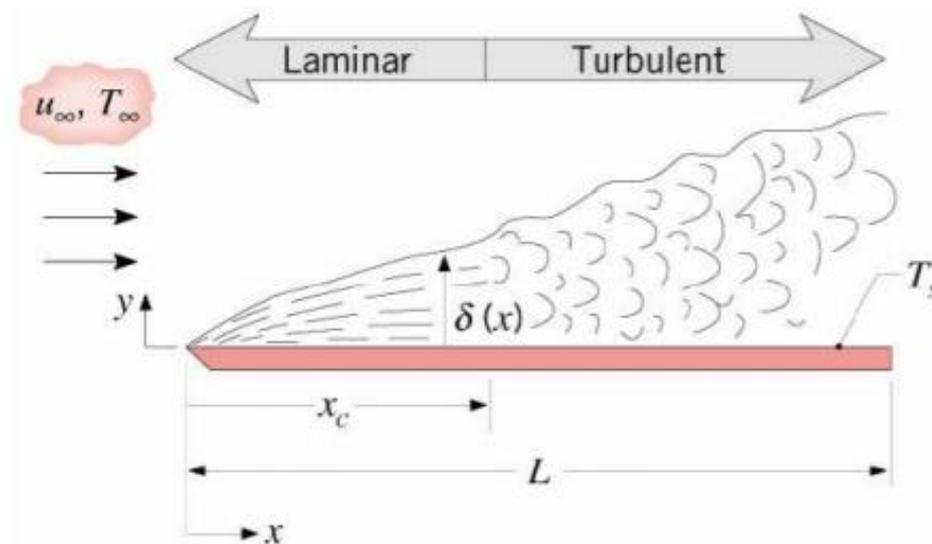


Figura 11 Capa límite en flujo laminar y turbulento

Fuente: Narváez (2014)

2.3.3 AIRE CALIENTE.

En los secadores convectivos, el aire caliente es suministrado a través del secador por medio de ventiladores de tiro forzado. Las fuentes de energía utilizadas para calentar el aire son muy variadas, así tenemos como combustibles derivados de los hidrocarburos tal como el gas natural que ofrece mayor flexibilidad y una respuesta más rápida y sobre todo

un menor costo, y también permite trabajar a temperaturas más altas, también se puede utilizar el petróleo BD5. El gas licuado de petróleo tiene características similares al gas natural, pero es relativamente más caro debido a la volatilidad de los precios internacionales. Gran parte de los secadores son calentados con vapor saturado evitando el contacto del producto que se está secando con los productos procedentes de la combustión. Las temperaturas de proceso obtenidos son limitados hasta valores de 150 °C, sin embargo, presentan con mucha frecuencia problemas de mantenimiento por obstrucción de las aletas del intercambiador de calor debido a la formación de depósitos o inquemados tal como ocurre con la combustión del petróleo. (Maupoey y Andres,2016)

La combustión es una reacción de oxidación que se utiliza en el sector industrial pero no es aplicable el uso de residuales en el proceso de secado de alimentos debido al riesgo de contaminación y a la presencia de cenizas. El petróleo caliente (impulsado desde un intercambiador de calor o quemador externo hacia los intercambiadores de calor) ofrece valores mucho mayores de las temperaturas que el vapor sin los riesgos de la presión asociada al vapor. Los costos iniciales son mayores, pero no presentan perdidas por condensación por lo que la eficacia global de energía es mayor. El calentamiento eléctrico rara vez se utiliza para la generación de aire caliente debido a su baja eficacia y elevado costo de energía eléctrica. Sus aplicaciones están limitadas para aquellos casos en los que se requieren temperaturas muy elevadas para el secado de minerales tal como ocurre en la industria del refinado y del cemento. (Maupoey y Andrés, 2016)

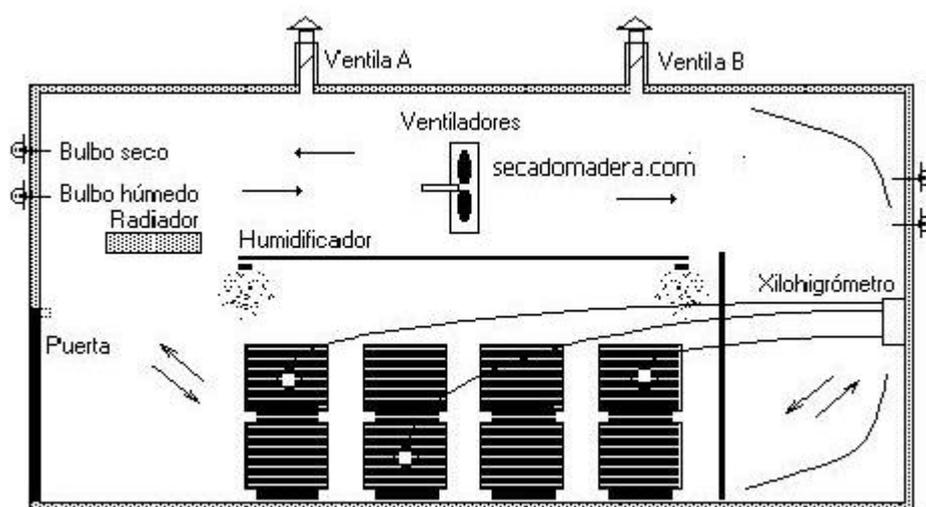


Figura 12 Distribución del flujo de aire caliente en una cámara de secado

Fuente: Manual Andino para el secado de madera (1999)

2.4 MADERA COMO COMBUSTIBLE.

La madera es un combustible ecológico: por ejemplo, cuando se combustiona libera CO₂ al medio ambiente, pero es el mismo CO₂ que absorbió de ella durante su crecimiento. Además, a la par que se talan los árboles viejos pueden plantarse árboles nuevos, con lo cual vemos que la madera es un combustible sostenible. En la vuelta al uso de la madera son pioneros los países escandinavos, que muestran un especial cuidado de sus bosques. La biomasa vegetal es la materia constituida por las plantas. La energía que contiene es energía solar almacenada durante el crecimiento por la fotosíntesis, por esta razón la biomasa constituye un recurso energético renovable y respetuoso con el medio ambiente. (Hidalgo, 2013)

El aserrín es un subproducto o desperdicio del proceso de habilitado de la madera, que se produce en los aserraderos, talleres de carpintería u otros del mismo rubro. A este material, que en principio es un residuo o desecho de las labores de corte de la madera, se le han buscado destinos diferentes usos o valor agregado con el paso del tiempo. Dentro del campo de la carpintería se le emplea en la fabricación de tableros de madera aglomerada y de tablero de fibra de densidad media. En otros sectores, la madera, ha sido usado empleada durante mucho tiempo en el campo de la higiene para ser extendido en el suelo y mejorar la adherencia de este y facilitar su limpieza por ejemplo en negocios donde pueda ser habitual el derrame de líquidos en el suelo. Se ha usado también como cama o lecho para animales, bien en bruto o bien tras su procesado, siendo aglutinado y pelletizado. En los últimos años ha aumentado su uso para la fabricación de Briquetas destinados a la alimentación de estufas, y de pellets destinados a la alimentación de calderas de biomasa. Según el Manual del grupo Andino para secado de madera el Poder calorífico inferior del aserrín seco es de 13 600 kJ/kg (Martínez, 2006)

El aserrín es el conjunto de partículas o polvillo que se desprende de la madera cuando ésta es habilitada también contiene minúsculas partículas de madera producidas durante el proceso y manejo de la misma, paneles contrachapados y/o aglomerados. Además del polvo, en el proceso de aserrado se genera la viruta, que es un fragmento de material residual con forma de lámina curvada o espiral. La composición química y física determinan el tipo de combustible o subproducto energético que se puede generar,

específicamente las características físicas influyen en el tratamiento previo que sea necesario aplicar. Por esto se necesita caracterizar estas biomasas en cuanto a contenido de humedad, volátiles, carbono fijo, cenizas y granulometría. En los residuos industriales, el contenido de humedad dependerá en gran medida de la fase del proceso en que se extraiga y del secado del producto antes de esa fase. Para el caso del aserrín y de otros residuos madereros se reportan valores de humedad superiores al 10 % y contenido de cenizas superiores a 0,5 %, como se indica en la tabla 1. (Serret, Giralt & Quintero, 2016)

Tabla 02 Características de residuos madereros

Residuos	Tamaño (mm)	Contenido de humedad (%)	Contenido de cenizas (%)
Lijaduras	<1	2-10 %	0,1-0,5 %
Virutas	1-12	10-20 %	0,1-1,0 %
Aserrín	1-10	25-40 %	0,5-2,0 %
Corteza desmenuzada	1-100	25-75 %	1,0-2,0 %
Residuos forestales		30-60 %	3,0-20,0 %

Fuente: Cite Madera (2019)

En los estudios e investigaciones realizados sobre pirolisis de aserrín de pino, se determinó que el contenido de humedad, el diámetro de la partícula de aserrín y el análisis elemental permitió obtener los resultados que se muestran en tabla 03. Para el aserrín de algarrobo, estudios realizados, arrojan similares resultados en cuanto a contenido de humedad y tamaño de partículas, ver (tabla 3). Para el aserrín de pino y para el de algarrobo, las mayores acumulaciones de partículas se alcanzaron para tamaños menores de 2 mm (Pino 86 % y algarrobo 97 %). El tamaño y la forma de las partículas de madera también tienen una importancia decisiva tanto para la manipulación como para la eficiencia de la quema de residuos, y desempeñan un papel importante en su combustibilidad. (Serret, Giralt & Quintero, 2016)

Tabla 03 Propiedades del aserrín de pino

Característica	Valor	Característica	Valor
Contenido de humedad (%)	15,5	Análisis de tamaños	
		Tamaño (mm)	(% peso)
Densidad aparente (kg/m ³)	197	≥4,0	2,29
Poder calorífico inferior (MJ/kg)	17,86	4,0-3,35	2,32
Análisis elemental (% peso)		3,35-1,98	6,60
C	50,65	1,98-1,60	9,62
H	6,03	1,60-1,25	17,87
N	0,14	1,25-0,84	23,13
O (por diferencia)	43,18	<0,84	18,24

Fuente: Serret, Giralt & Quintero (2016)

2.5 ESTADO DEL ARTE.

2.5.1 BALANCE DE ENERGIA.

Los balances de energía se rigen según 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 se conoce como el 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. 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 la ecuación de la 1 ley de la termodinámica. (Hernandez,2017)

Según el texto de termodinámica de Cengel se presenta la ecuación de la 1 ley de la termodinámica:

$$E = Q - W \dots \dots \dots (8)$$

E =energía neta transferida.

Q = flujo de calor

$W = \text{trabajo desarrollado por unidad de tiempo.}$

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. (Hernandez,2017)

2.5.2 COMPONENTES DE LA CAMARA DE SECADO.

El dimensionamiento de la cámara de secado implicó tomar en consideración las medidas de la materia prima (pieza de madera), la cual nos permitió calcular la dimensión de la Cámara de secado. Para las dimensiones de la cámara diseñada se debió conocer la cantidad de madera o el volumen. Se presentan las ecuaciones desarrolladas por Martínez (2013) para la longitud, ancho y altura de la cámara de secado.

Longitud de la cámara.

Para hallar la longitud de la cámara se debe conocer la longitud de la madera, según la siguiente ecuación:

$$C = L + (2 * T) \dots \dots \dots (9)$$

Donde:

C= Longitud de la Cámara

L= Longitud de la madera.

T= Espacio de circulación a la hora de apilar la madera dentro de la cámara.

Ancho de la cámara.

En la fila se ubican tablones, sabiendo que la medida del ancho de cada tablón, Donde “Z” es el espacio que se dará para el operador,” Y” el ancho total de la madera,” n” es ancho total de la cámara.

$$n = y + 2z \dots \dots \dots (10)$$

Donde:

n= Ancho de la Cámara de Secado.

y= El ancho del paquete de madera.

Z= Espacio de la cámara para circular el operario en caso de falla de sensor y también para facilitar la circulación del aire.

Altura de la cámara.

La altura de la cámara se determinó a partir de número de filas del paquete de madera.

$$NF = \frac{\text{Numero de Tablones en total}}{\text{Numero de Tablones por fila}} \dots \dots \dots (11)$$

$$Hp = NF * \text{Separador total.} \dots \dots \dots (12)$$

Hp=Altura del paquete de madera.

$$H = Hp + \text{Holgura para flujo de aire} \dots \dots \dots (13)$$

La holgura para flujo de aire está referido al espacio sobre la altura del paquete de madera y el techo de la cámara.

Las paredes del horno deben poseer características como: Hermeticidad. buen aislamiento térmico, resistencia a la corrosión por los ácidos liberados por la madera en el proceso de secado y resistencia a temperaturas alrededor de los 60°C (temperatura máxima alcanzada). El material que más se ajusta a las características mencionadas y además el más utilizado para la construcción de hornos es el ladrillo, material del que esta confeccionado el horno. (Martínez, 2013)

La ejecución de la puerta es uno de los aspectos de mayor cuidado en el montaje de la cámara de secado, ya que es donde se pierde un porcentaje del calor que entrega el sistema de calefacción a la cámara de secado. Las características principales que debe tener la puerta son: De peso ligero para fácil movilidad, hermeticidad, debe estar construida en materiales resistentes a la corrosión, buen aislamiento térmico, resistencia a temperaturas alrededor de los 43,5°C (temperatura máxima alcanzada), fácil maniobrabilidad y debe facilitar la entrada y salida de la carga de madera.

2.5.3 FLUJO DE ENERGIA ENTREGADO POR EL ASERRIN.

El Flujo de energía calorífica suministrada por el aserrín en el hogar del horno es el siguiente:

Flujo de energía suministrada por el aserrín en el hogar:

$$\dot{Q}_s = \dot{m}_a * PCI_a \dots \dots \dots (14)$$

Donde:

\dot{m}_a = Flujo masico de aserrín.

PCI_a = Poder calorífico inferior del aserrín.

El esquema de recuperación de calor en el ducto de escape del horno de aserrín se muestra en la siguiente figura:

FLUJO MASICO DE AIRE CALIENTE Y GASES DE LA COMBUSTION DE ASERRIN

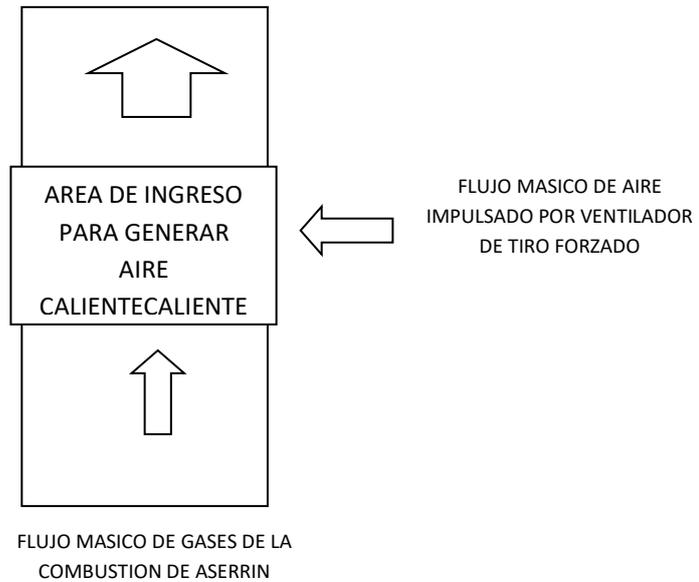


Figura 13 Distribución de flujos para la generación de aire caliente diluido en gases de la combustión

El flujo de calor suministrado por los gases de la combustión saliente del horno de aserrín aprovechable para la el generador de aire caliente es el siguiente:

$$\dot{Q}_{gc} = \dot{m}_{gc} * Cp_{gc} * (T_{gi} - T_{gf}) \dots \dots \dots (15)$$

Dónde:

\dot{Q}_{gc} = Flujo de calor suministrado por los gases de la combustion del aserrin

\dot{m}_{gc} = Flujo masico de gases de la combustion.

Cp_{gc} = Calor especifico a presion constante de los gases de la combustion.

T_{gf} = Temperatura final de los gases de la combustión (°C)

T_{gi} = Temperatura inicial de los gases de la combustión (°C)

El flujo de energía calorífica para la generación de aire caliente, es función del calor sensible recuperado de los gases de la combustión y absorbido por el aire necesario para el proceso de secado de la madera y se evalúa en función a la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{ac} = \dot{m}_{ac} * C_{p_{ac}} * (T_{fac} - T_{iac}) \dots \dots \dots (16)$$

Dónde:

\dot{Q}_{ac} = Flujo de calor para generar el aire caliente

\dot{m}_{ac} = Flujo masico del aire caliente.

T_{fac} = Temperatura final del aire caliente

T_{iac} = Temperatura inicial del aire caliente

$C_{p_{ac}}$ = Calor especifico a presión constante del aire caliente

Se tiene la siguiente ecuación de equilibrio en transferencia de calor para la generación de aire caliente:

$$\dot{Q}_{gc} + \dot{Q}_{ac} = \dot{Q}_{acT} \dots \dots \dots (17)$$

Donde:

\dot{Q}_{acT} = Es el Flujo de aire caliente total para el proceso de secado de madera. El cual por la ecuación de continuidad es igual a la suma de los gases calientes generados por la combustión del aserrín y el aire caliente de dilución.

2.5.4 BALANCE DE ENERGIA EN LA CAMARA DEL SECADOR.

Para el secado de la madera en el interior del horno se debe calentar todos los materiales hasta la temperatura de funcionamiento del horno, para esto se debe suministrar calor de un sistema de calefacción. Como no existe un cambio de fase de la madera entonces solo se considera el calor sensible. El Calor sensible este compuesto por el flujo de calor de aire caliente necesario para incrementar la temperatura desde 20°C hasta la temperatura de secado.

$$\dot{Q}_{u1} = \dot{m}_m * C_{p_m} * (T_f - T_a) \dots \dots \dots (18)$$

Dónde:

\dot{Q}_{u1} = Flujo de energía calorífica para calentar la madera desde la temperatura ambiental hasta la temperatura de secado.

\dot{m}_m = Flujo másico de madera.

C_{p_m} = Calor específico a presión constante de la madera.

T_a, T_f = Representan las temperaturas de entrada de la madera al secador y la temperatura de inicio del proceso de secado (valor de temperatura en el cual la humedad contenida en la madera empieza a evaporarse)

Del mismo modo una vez alcanzada la temperatura de inicio de secado, el flujo de energía adicional debe provocar la separación de una fracción de la humedad contenida en la madera. Se tienen dos componentes, la primera que cuantifica el flujo de energía calorífica para calentar la fracción de agua a evaporar contenida en la madera hasta los 100 °C mediante un proceso de variación de calor sensible y el flujo de energía calorífica para evaporar el agua contenido en la madera en un proceso de cambio de calor latente:

$$\dot{Q}_{u2} = m_w * C_{e_w} * (T_{fs} - T_f)_w + m_w * \Delta h_{fg} \dots \dots (19)$$

Se tienen los siguientes datos:

m_w = fracción de agua contenido en la madera a secar en el proceso de secado.

C_{e_w} = Calor específico del agua a presión constante)

T_{fs} = Temperatura final del agua antes de cambiar de fase a presión atmosférica)

T_f = Temperatura inicial del agua al momento que se separa de la madera e inicia su proceso previo a la evaporación o cambio de fase.

Δh_{fg} = Entalpia de vaporización del agua a 1 Bar de Presión y 100 ° C de temperatura.

Flujo de energía calorífica utilizada para calentar las paredes del secador:

El cuerpo del secador conformado por las paredes y techo están fabricadas de ladrillo, en un proceso de equilibrio térmico, absorben parte del calor suministrado por el aire caliente.

El coeficiente global de transferencia de calor (U) obtenida del texto de Kern (1999) se evalúa según la siguiente ecuación:

$$U = 8,4 + 0,06 * (T_{ext} - T_{amb}) \dots (20)$$

De donde:

T_{ext} = Referida a la temperatura exterior de las paredes del secador.

T_{amb} = Es la temperatura del medio ambiente.

Así mismo la Potencia calorífica utilizada para calentar el material conformante del secador se evalúa según la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{u3} = A_{tc} * U * (T_{is} - T_{amb}) \dots (21)$$

Dónde:

A_{tc} = Es el área lateral de transferencia de calor.

En el equilibrio el flujo de aire caliente es igual a la suma de cargas térmicas en la cámara del secador, según la siguiente ecuación de igualdad:

$$\dot{Q}_{ac} = \dot{Q}_{u1} + \dot{Q}_{u2} + \dot{Q}_{u3} \dots \dots \dots (22)$$

2.5.5 ESTADO DEL ARTE DEL HORNO:

Un generador de aire caliente es un equipo térmico que suministra energía útil y mediante intercambiadores de calor permite la transferencia de la energía calorífica al aire, elevando su temperatura, mediante un proceso de variación de calor sensible. El aire caliente generado es empleado en diversos procesos tal como el secado y la evaporación. El generador de aire caliente libera la energía calorífica proveniente de la combustión de combustibles tal como biomasa, coque, gas natural, bunker, Diesel, Gas licuado de petróleo, biomasa entre otros.

Un generador de aire tiene los siguientes componentes:

- Horno. Es el espacio cerrado donde se ubica la parrilla de quemado de aserrín el cual es insuflado por el aire de la combustión por la parte inferior. La parrilla consta de ranuras para desalojar por gravedad las cenizas formadas por la combustión.
- Quemador tipo de parrilla, es la cámara de combustión u hogar donde se quema el combustible suministrado. Es necesario asegurar el ingreso de aire para tener combustión.
- Sistema de alimentación, permite la dosificación del ingreso de combustible a la parrilla de quemado.

- Calentador de aire, son intercambiadores de calor en donde se transfiere el calor de combustión al aire a ser calentado.
- Sistema de ventilación, se requieren son dos: uno para el suministro del aire de la combustión a la parrilla de quemado y el segundo para generar el aire caliente que circula por el calentador de aire. (Celleri, 2008)

Para el funcionamiento del generador de aire caliente se suministró aserrín como combustible. La combustión es un proceso exotérmico de oxidación, el cual está dado por la reacción del oxígeno con cualquier material capaz de ser oxidado, en este caso con un combustible. Este proceso viene está acompañado por la difusión de calor y luz. La Biomasa es materia formada mediante un proceso de fotosíntesis. La biomasa incluye a la madera, plantas verdes o materia animal (excrementos de animales), que puedan ser combustionadas directamente o ser transformada a otros tipos de combustibles. Se considera biomasa a los productos derivados del material biológico. El combustible que se va a utilizar en el funcionamiento del generador de aire caliente, es el aserrín proveniente de los procesos de habilitación de madera de la Empresa ORMEGU. (s.f.)

La operación consiste en suministrar aire de combustión en exceso, para asegurar la combustión completa. Para aserrín o madera se recomienda usar un exceso de aire entre 40 y 60%. Con un exceso del 40% existe el riesgo de no completar la reacción de la combustión del aserrín o biomasa. Por otro lado, con un exceso de aire mayor al 60% en el interior del equipo u horno se comenzará a enfriar demasiado las paredes, reduciéndose sustancialmente la transferencia de calor. (Celleri, 2008)

El cálculo del aire en exceso es fundamental en los cálculos de diseño del equipo térmico, a través del cual se dimensionará la capacidad del blower o ventilador de tiro forzado requerido, obviamente en base al tamaño del equipo u horno y la alimentación de combustible por hora. Los cálculos y consideraciones requeridos para el dimensionamiento que se presentan a continuación. (s.f.)

a) Horno y parrilla:

La parrilla es el lugar o ambiente donde se asienta el material a ser quemado. En este caso el aserrín es el combustible a emplear. La parrilla presentara unos orificios donde pueda caer la ceniza e ingresar el aire suministrado para la combustión. Si la parrilla

está mal diseñada, se genera el siguiente percance : La forma de la parrilla no permite una correcta distribución del combustible, este se podría acumular en ciertos lugares impidiendo el paso del aire o la creación de canales de aire, el cual a su paso no encuentra combustible y ayuda a enfriar la cámara de combustión. Por esta razón la parrilla debe contener suficiente cantidad de orificios para permitir el ingreso del aire de la combustión de la manera más uniforme y permanente. (Celleri, 2008)

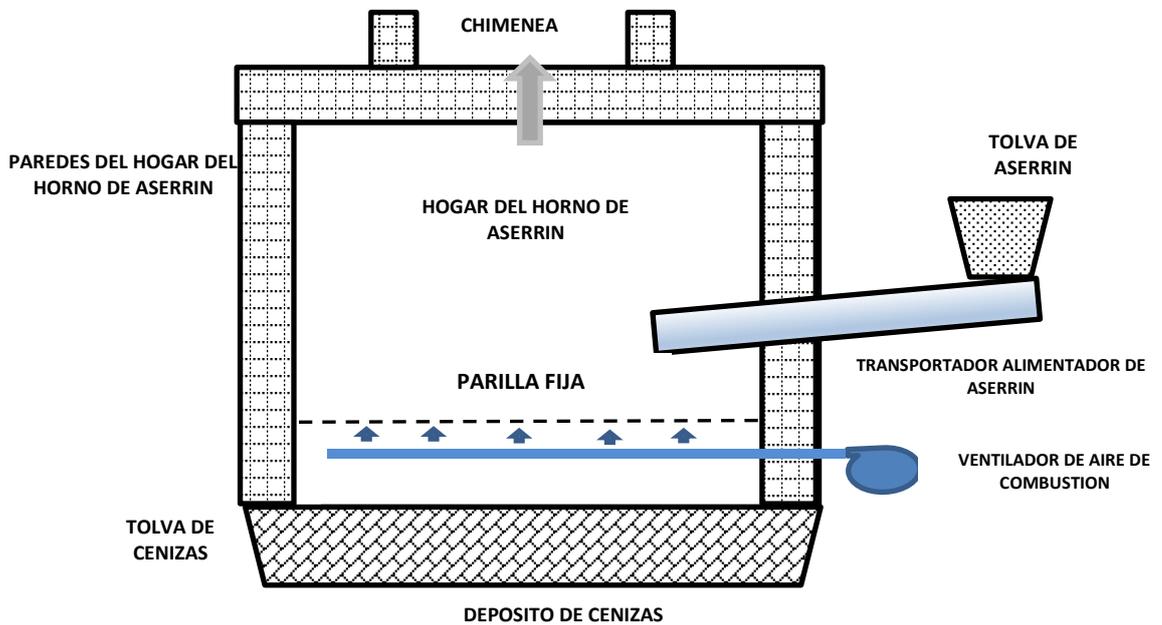


Figura 14 Distribución del horno para generación de aire caliente.

Las geometrías de mayor uso para las parrillas, son de tipo circular, rectangular y cuadradas. La Parrilla cuadrangular, tiene una buena distribución del combustible, no tiene lugares inaccesibles a diferencia de la parrilla rectangular. No puede rotar con dispositivos mecánicos. Mientras que la Parrilla rectangular, no es recomendada porque la distribución del combustible no es uniforme alrededor de toda la parrilla. Adicionalmente siempre existirá un lado más alejado, complicado de acceder, restringiendo la correcta alimentación del combustible en la cámara de combustión. Su limitada accesibilidad dificulta el mantenimiento y limpieza, complicándose al momento de retirar algún residuo sin combustión, que obstruye el área útil de la parrilla. (Celleri,2008)

Se recomienda que los orificios o espacios libres para el ingreso del aire ocupen de un 30 al 50% de su área total. La selección del material de la parrilla debe buscarse de un material resistente a elevadas temperaturas y además los orificios no deben debilitar su estructura general.

Las zonas de intercambio de calor se fabricarán de acero resistente a altas temperaturas. La cámara de combustión estará recubierta en su totalidad de material refractario de baja conductividad, el cual puede garantizar el funcionamiento 24 horas al día y 365 días al año. La temperatura de flama es la temperatura máxima que se puede alcanzar con la combustión del aserrín. Para lograr obtener esta lectura de temperatura se requiere de un pirómetro especial de alta temperatura. Para obtener esta temperatura, se asumirán las siguientes condiciones en el modelo teórico.

- La combustión se da en forma adiabática ($Q = 0$)
- La variación de energía cinética y potencial son despreciables
- El balance energético total del proceso es $\Delta H = 0$. (Celleri, 2008)

Básicamente hay que encontrar la energía desprendida debido a la reacción de combustión, aunque se le haya primero teóricamente. Se asume como premisa que toda la energía se transforma en calor y no en energía cinética ni potencial, es decir toda la energía se transferirá en forma de calor hacia los productos de la combustión generándose la reacción exotérmica requerida. La cámara de combustión es fabricada de ladrillo refractario, que puede soportar temperaturas de hasta 1700 °C, la alimentación del hogar se realiza a través de un tornillo sinfín por la parte superior de la cámara de combustión y el aire de combustión ingresa por un blower en diferentes puntos de la parrilla, por la parte inferior. (Celleri, 2008)

El sistema de alimentación de combustible consta de un tornillo de alimentación accionado por un motor eléctrico, en el cual se puede controlar la velocidad de giro mediante un variador de velocidad. Este tornillo va desde el silo de almacenamiento del combustible, hasta la parte superior de la parrilla donde se realiza la combustión. El sistema de seguridad: consta de un dispositivo que inyectara el agua dentro de la cámara del tornillo sinfín, si la temperatura de esta cámara es de 50°C o superior. Adicionalmente corta el suministro eléctrico del equipo. Esto es para evitar el retroceso de la llama al silo de almacenamiento. Las variables de control son la

alimentación del combustible y el ingreso de aire de combustión. La variable de salida es la temperatura de salida de los gases calientes de la combustión. Tiene adicionalmente alarmas, que evitan que el equipo trabaje a temperaturas o condiciones peligrosas para el equipo. (Celleri, 2008)

2.6 INDICADORES DE DESEMPEÑO ENERGETICO.

Un indicador de desempeño energético (IDEn) o también conocido por key performance indicator (KPI), es un valor cuantitativo que evalúa y aporta la información sobre el desempeño energético de un sistema, línea de producción, empresa o entidad pública. Es cuantificable y objetiva, de manera que permite realizar un seguimiento o medición de las diferentes variables energéticas características y el parámetro de producción o servicio y del mismo modo permite la comparación entre indicadores de desempeño de la misma naturaleza. Por lo general, son parámetros medibles, ratios o números específicos. Los indicadores de desempeño energético se emplean en todos los ámbitos de la sociedad. Podemos encontrar indicadores financieros, energéticos, ambientales, poblacionales, etc. Son un instrumento útil y, en ocasiones, imprescindible para conocer la situación energética de una empresa, entidad u organización. (Guevara, 2019)

Los Indicadores de desempeño energéticos o Números característicos de producción, son unidades de comparación entre las unidades de energía consumida o equivalentes relacionadas a esta y las unidades de producción o servicio brindado, con la finalidad de poder cuantificar como afecta en la obtención de un producto o un bien la intensidad de energía consumida. (Carbajal, 2013)

Tenemos los siguientes IDEn:

Indicadores de desempeño Energéticos Técnicos. El estudio está referido al consumo de energía (en unidades de energía o unidades de flujo del insumo energético), por unidad de producción, en este caso agua evaporada del proceso de secado. Así tenemos:

$$IDET = \frac{\text{Unidades de combustible}}{\text{Toneladas de agua evaporada}} \dots \dots (23)$$

Indicadores de Desempeño Energético Económico. Este tipo de indicador de desempeño está asociado al costo o facturación por consumo de combustible en la producción.

$$\text{IDEE} = \frac{\text{U\$ Facturacion de combustible}}{\text{Toneladas de agua evaporada}} \dots \dots \dots (24)$$

Los Indicadores de Desempeño Energético Ambiental nos permiten comparar las emisiones de dióxido de carbono equivalentes emitidos a la atmosfera por el consumo de combustible asociado al proceso por cada unidad de agua evaporada del proceso de secado.

$$\text{IDEA} = \frac{\text{Toneladas de CO}_2 \text{ emitidas}}{\text{Toneladas de agua evaporada}} \dots \dots \dots (25)$$

3.1 MATERIAL:

3.1.1 Referente al Combustible:

El Aserrín, es un material orgánico natural, por lo general presenta características muy complejas y variables que muy poco han sido investigadas. Depende principalmente del tipo de madera de donde provenga, región y clima ya que éstas varían de la misma forma que las especies vegetales, según las zonas geográficas y las condiciones climáticas. Es un producto muy estable y su acumulación representa un problema serio de contaminación ambiental, en particular en los suelos donde se deposita. Según la FAO (2014) detalla que la generación media de residuos o aserrín en la elaboración de madera aserrada, para las coníferas, es de 30 por ciento de la biomasa del tronco utilizado, lo que incluye aserrín (5 a 8 %) y corteza (10 a 14 %), la acumulación de los residuos en los aserraderos puede llegar a obstaculizar el desarrollo del proceso productivo, por lo que es necesario que sean evacuados con prontitud. Algunos productores los venden o regalan a otras empresas que les dan diferentes usos, pero en muchas ocasiones se envían a los vertederos o se incineran indiscriminadamente, lo que es un derroche de materia orgánica rica en nutrientes

Según la Revista Forestal del Perú (2015) , se determinaron los valores de poder calorífico de 20 especies forestales de la amazonia peruana, los cuales siguiendo el método que se emplea para determinar el calor de combustión de un material orgánico en estado sólido. El poder calorífico superior promedio de las muestras estudiadas es de 4,751 cal/g. A partir de los componentes químicos (cenizas, extractivos en alcohol-benceno, extractivos en agua, lignina y carbohidratos totales), de las maderas estudiadas y su poder calorífico determinado experimentalmente, se ha encontrado una fórmula que permite estimar el poder calorífico de cualquier madera, en base al porcentaje de sus compuestos químicos, sin necesidad de recurrir a la determinación experimental.

Se debe señalar que la composición química posee una fuerte influencia en el poder calorífico inferior; sobre todo la presencia de lignina y los extractivos totales como taninos, grasas y aceites. Se encontró que para la lignina aislada por el ácido sulfúrico un valor de 6 100 cal/g. y los extractivos en alcohol-benceno 6 250 a 6 800 cal/g.; valor que es inferior al reportado por otros autores quienes asignan valores entre a 8 000 a 10 000

cal/g., pero estas cifras corresponden a maderas resinosas. (Revista Forestal del Perú, 2015)

En una pulpa soluble se obtuvo un valor de 4 070 cal/g., y para una pulpa blanqueada, conteniendo principalmente celulosa y 29 % de pentosanos un valor de 4 130 cal/g., admitiendo que la celulosa y pentosanos tienen poder calorífico inferior del mismo orden. Para una mezcla de maderas africanas se encontró, aproximadamente 4 500 cal/g. para los extractivos en agua. (Revista Forestal del Perú, 2015)

Se presenta la siguiente tabla de valores:

Tabla 04: Poder calorífico experimental de especies forestales peruanas

Muestra	Especie	Poder calorífico (kcal/kg)
1	Apacharama	4 670
2	Bellaco caspi	4 700
3	Carahuasca	4 780
4	Caupuri	4 768
5	Copal	4 721
6	Isma moena	4 798
7	Machimango	4,745
8	Sacha caoba	4.763
9	Shiari	4 719
10	Tornillo	4 798
11	Cumala(Madera blanca)	4 735
12	Marupa (similar caoba)	4 883
13	Quillo sisa (blanca)	4 690
14	Shiringa (árbol de caucho)	4 621

Fuente: Revista Forestal del Perú (2015)

Para nuestro caso se hará uso de las siguientes residuos o aserrín proveniente de:

- Tornillo.
- Quillo sisa.
- Sasha caoba.

Es el tipo de aserrín de mayor tipo obtenido en la Empresa ORMEGU SAC. Debido a que la empresa si es bien es cierto habilita otro tipo de madera, el tornillo es la madera de mayor trabajabilidad en este periodo de estudio, y por lo tanto el aserrín obtenido es de madera tornillo del cual se obtiene un promedio 0,350 kg/día.

Según la FAO (2014), el tamaño de las partículas de aserrín fluctuó entre 0,8 mm y 2,0 mm. Al ponderar las distintas clases de tamaño por la proporción de peso de aserrín, se determinó un tamaño promedio de 1,36 mm. Un valor superior a 2,0 mm se considera un aserrín muy grueso y presentara otras condiciones de combustión, y generalmente se presentan en los grandes aserraderos forestales en la selva. Mientras que menores a 0.8 mm de diámetro se considera polvo de madera, y se presenta en aquellos grandes aserraderos en los cuales se trabaja madera blanca de baja consistencia y peso.

Según la FAO (2014), se considera un valor específico de la madera a secar promedio de 1,76 kJ/kg °C

3.1.2 Referente al horno para aserrín:

La forma de la parrilla va a estar determinada por la forma de la cámara de combustión, la cual es cuadrada. Con esta geometría la biomasa se puede distribuir en forma regular como se mencionó en el capítulo 2. No se escogió una geometría redonda por facilidad al momento de construir el equipo. Las dimensiones definidas para la parrilla son:

Largo: $L = 0,6 \text{ m}$
Profundidad: $P = 0,60 \text{ m}$
Área: $A = 0,36 \text{ m}^2$

Justificaciones para el tamaño de parrilla.

- Con una cámara de combustión de esas dimensiones se tiene una alimentación de 50 a 80 kg de aserrín por hora. Esta cantidad es manejable por una persona en los ambientes de la Empresa ORMEGU, y también por las restricciones de espacio del lugar, y más aún que se está diseñando un sistema experimental.
- El equipo tiene una buena estabilidad mecánica, debido al blower o ventilador de muy baja potencia para suministrar el aire de combustión.
- Es un hogar tipo parrilla en el cual se pueden utilizar otros materiales de mayor tamaño como carbón pulverizado de madera o viruta de madera.

Haciendo una relación directa con trabajos experimentales tal como el de Celleri (2008) se tiene una relación de consumo de:

$$62 \frac{\text{kg de biomasa}}{\text{h}} \text{ para una parrilla con un area de } 0,126 \text{ m}^2$$

Según este último antecedente se tendría un factor de:

$$177,0 \frac{\text{kg de aserrin}}{\text{h}} \text{ para una parrilla con un area de } 0,36 \text{ m}^2$$

La alimentación es automática y por lotes desde un silo al equipo y trabaja 24 horas al día sin parar. Por esta razón se asumirá un factor de seguridad y se tomará que el equipo funcionara con el 70% del área total de la parrilla, es decir necesita una alimentación de 177 kg. de aserrín por hora.

Como se mencionó en el capítulo anterior, entre el 80 y el 90% de la energía se pierde por la chimenea, punto en el cual se instalará el calentador de aire, para provechar el calor sensible de los gases de la combustión. Por esta razón en el diseño del equipo por seguridad, se va a trabajar con la mayor pérdida que es del 90% del total del calor generado. Las pérdidas generadas por las paredes del equipo, se las va a incluir en este 10%, porque son perdidas pequeñas comparadas con la perdida en la chimenea.

La cantidad de aire teórico requerido para la combustión con la máxima alimentación para biomasa derivada de madera es de $4,17 \text{ m}^3$ de aire/kg de biomasa, multiplicando por la cantidad de combustible alimentado por hora, da la cantidad teórica de aire de combustión requerida. Al igual que en los pasos anteriores, se calculará el aire necesario para la capacidad máxima del equipo y el cálculo con el 60 % de exceso de aire como factor de seguridad. Para la selección adecuada del equipo de ventilación, se tomará la condición más crítica, esta es el funcionamiento del equipo a la máxima alimentación y el exceso máximo de aire permitido.

Por la necesidad de que el aire de combustión atraviese los orificios de la parrilla y se distribuya uniformemente en todo el aserrín, se escogerá un blower o soplador, ya que este proporciona mayor presión para vencer obstáculos que el aire pudiera enfrentar a su

ingreso, el ingreso de aire se realizara a través de una tubería de acero con orificios de 1/16" de diámetro para una mayor impulsión del aire sobre el combustible. En el mercado local de Chimbote existen sopladores chinos muy baratos, pero estos carecen de información importante para una adecuada selección. El fabricante no especifica el caudal de salida de los sopladores. Por esta razón hubo la necesidad de calcular la velocidad de salida de cada uno, con un anemómetro digital.

3.1.3 Alcances del secado de madera:

Para el proceso de secado de la madera se tiene el siguiente grafico de intercambio de calor para:

Primero la madera en su totalidad alcanza la temperatura de equilibrio en la cámara de secado hasta una temperatura de 60 °C. Seguidamente la fracción de humedad contenida en la madera incrementa su temperatura de cambio de estado y se evapora a presión constante, a una temperatura de 100 °C.

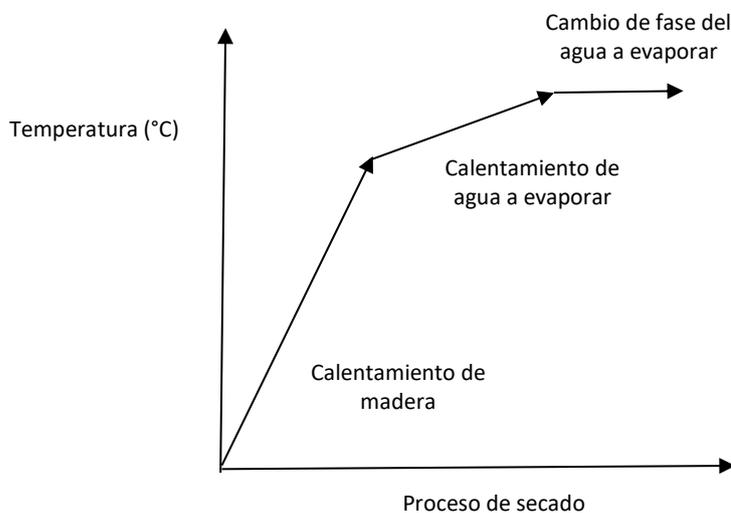


Figura 15 Disposición de temperaturas en proceso de secado de madera.

3.1.4 Equipamiento:

Se hizo del siguiente equipamiento de propiedad de la Empresa ORMEGU.

- Anemómetro digital. UNI-T UT-362, par medición de temperatura del aire y temperatura del mismo. Permitió determinar la velocidad del aire a través del blower o soplador de aire de la combustión y la velocidad del aire a través del ducto de aire caliente.

O1: Indicadores de desempeño energético (condición inicial: secador de madera de aire caliente con BD5).

O2: Indicadores de desempeño energético (condición final: secador de madera de aire caliente con aserrín).

X: Generador de aire caliente con aserrín.

OE: Objeto de estudio.

3.2.3 TECNICAS E INSTRUMENTOS:

Las técnicas de recolección de información fueron las siguientes:

Observación, que consiste en observar personas, hechos, acciones, situaciones, etc., para obtener una determinada información que se pretende investigar (Hernández y otros, 2010, p. 173). Tomando nota de manera selectiva y organizada de todos aquellos datos que nos sean de relevancia para la investigación cuya data serán tomados con la ayuda de equipos e instrumentos que nos facilitaron el cumplimiento de los objetivos específicos propuestos.

Investigación, basados en la recopilación de información (física o virtual) que nos proporcionó la ayuda suficiente para lograr encaminarnos con el propósito de culminar la investigación y poder realizar nuestros sondeos a la población destinada del presente proyecto.

Documentación, es una labor mediante un trabajo intelectual en el cual se extrajeron nociones de una fuente documental, que nos sirvió de gran ayuda para la recopilación de información en documentos que permitió seleccionar, almacenar, difundir y transferir informaciones afines a la investigación (libros, revistas, tesis y otros).

Los instrumentos de recolección de datos fueron los siguientes:

Registro de información, consistió en un instrumento de recolección de información a registrar en función a los factores que son resultados antes y después de la implementación del generador de aire caliente con aserrín.

Ficha técnica, son instrumentos que permitieron el registro e identificación de las fuentes de información, así como el acopio de datos o evidencias respecto al diseño del generador de aire caliente y su efecto en los indicadores de desempeño energético.

3.2.4 METODOLOGIA DE CALCULO:

Se presenta la siguiente secuencia de cálculo para los resultados del informe de investigación:

- a) Balance de energía con sistema tradicional utilizando sistema de generación de aire caliente con petróleo BD5 y determinación de los indicadores de desempeño energético con sistema convencional.

- b) Caracterización del sistema de horno con parrilla para la combustión de aserrín. Verificación de alimentación de la carga y del aire de la combustión, para un proceso de 177 kg de aserrín/hora.

- c) Cuantificación del flujo de calor generado para la obtención de gases residuales para la generación de aire caliente.

- d) Balance de energía en la cámara de secado.

- e) Determinación de los indicadores de desempeño energético del sistema de secado de madera con aire caliente generado por gases de la combustión del aserrín.

- f) Benchmarking energético entre indicadores de desempeño energético.

4.1 Condiciones actuales de secado de madera con aire caliente generado con gases de la combustión de petróleo BD5.

Datos de Ingreso para el Balance de Energía.

Tabla 06 datos de ingreso cámara de combustión convencional para generación de aire caliente

PARAMETRO	SIMBOLOGIA	VALOR	UNIDAD
Flujo másico de combustible	\dot{m}_c	4	Gal/h
Relación aire/combustible (30% de exceso de aire)	R a/c	15,4	
Flujo másico de aire de la combustión	\dot{m}_{ac}	202,66	kg/h
Flujo másico del aire de dilución	\dot{m}_{ad}	¿?	kg/h
Poder Calorífico Inferior del combustible	P_{ci}	9 860	kcal/Kg
Temperatura del aire de la dilución entrante en la cámara de combustión	T_{ad}	20	°C
Temperatura superficial de las paredes de la cámara de combustión	T_s	90	°C
Temperatura a la salida de gases y aire de dilución de la cámara de combustión	T_{cc}	300	°C
Flujo másico de gases de la combustión salientes de la cámara de combustión	\dot{m}_g	215,82	kg/h
Calor específico de los gases de la combustión evaluada a su temperatura de salida de la cámara de combustión.	$C_{p_{g1}}$	0,2682	kcal/Kg-°C
Calor específico del aire de dilución evaluado a su temperatura de salida de la cámara de combustión	$C_{p_{ad2}}$	0,2682	kcal/Kg-°C

Fuente: Evaluación de cámara convencional

Tabla 07 Dimensiones de la Cámara de combustión convencional para generación de aire caliente

Dimensiones (m)	Largo	1,2
	Diámetro	0,5
Temperaturas (°C)	Ambiente	20
	Material (lateral)	90
Emisividad ϵ	0,5	

Fuente: Mediciones realizadas en la Empresa ORMEGU.

Se presenta la configuración de la cámara de generación de aire caliente convencional con Petróleo BD5:

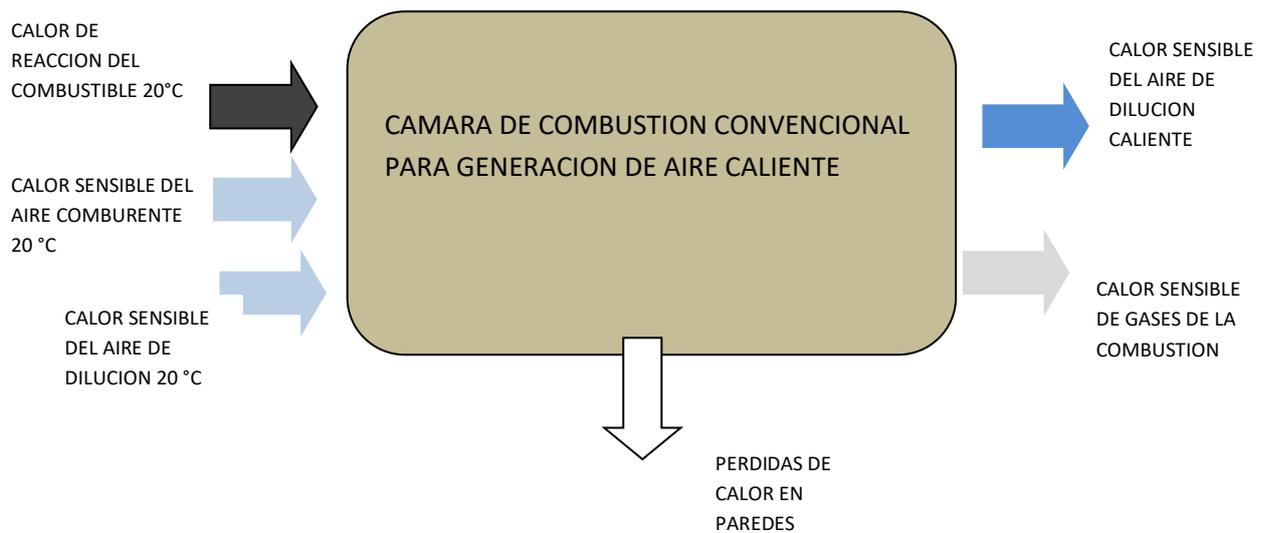


Figura 16 Balance de energía en Calor en Cámara de combustión convencional para generación de aire caliente

a. Balance de energía en la cámara de combustión convencional.

- Calor aportado por el combustible: Aplicando la ecuación 14.

$$\dot{Q}_1 = 4 \frac{\text{galon}}{\text{h}} * 3,29 \frac{\text{kg}}{\text{galon}} * 9,860 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} = 129\,767,6 \text{ kcal/h}$$

- Calor aportado por los gases de la Combustión a la salida de la cámara de combustión: Aplicando la ecuación 18 para cambio de calor sensible.

$$m_{GC} = 4 * 3,29 * 15,4 = 202,66 \text{ kg/h}$$

$$\dot{Q}_{GC} = 202,66 * 0,2682 * (300 - 20) = 15\,218,9 \text{ kcal/h}$$

- Calor del aire de dilución a la salida de la cámara de combustión, aplicando la ecuación 18 para cambio de calor sensible.

$$\dot{Q}_{AD} = 114\,041,5 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} = \dot{m}_{ad} * 0,2682 * (300 - 20) = 75,09 * \dot{m}_{ad}$$

- Pérdidas de calor por las paredes laterales y frontal de la cámara.

El Área lateral es:

$$A = (L * \pi * D) + \left(\frac{\pi * D^2}{4}\right)$$

Reemplazando los valores de las dimensiones de la cámara de combustión tenemos que el Área de transferencia de calor es:

$$A = 2,08 \text{ m}^2$$

$$\dot{Q}_{TC} = \text{Cte de Stefan Boltzmann} * \text{Emisividad} * A * (T_{\text{material}}^4 - T_{\text{amb}}^4)$$

$$\dot{Q}_{TC} = 4,88 * 10^{-8} * 0,5 * 2,08 * (363^4 - 293^4) = 507,2 \text{ kcal/h}$$

- Aplicando un balance entre calores entrantes y calores salientes en la cámara de combustión convencional se determina el flujo de aire de dilución por diferencia de flujos de calor.

$$\dot{m}_{ad} = 1\,518,7 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \text{ de aire de dilucion.}$$

- En la siguiente tabla de Flujos de Calor para la Cámara de Combustión es la siguiente:

Tabla 08 Balance de energía en cámara de combustión convencional

Calores Entrantes (kcal/h)			Calores salientes (kcal/h)		
\dot{Q}_1	129 767,6	100,00%	\dot{Q}_{GC}	15 218,9	11,7%
			\dot{Q}_{AD}	114 041,5	87,9%
			\dot{Q}_{TC}	507,2	0,04%
			-----	-----	-----
Total	129 767,6	100,0 %	Total	129 767,6	100,0%

Fuente: Elaboración Propia

Seguidamente se calcula la potencia suministrada por el ventilador de aire de dilución con los siguientes valores:

$$\text{Caudal de aire} = 0,510 \text{ m}^3/\text{s} \text{ (1 518,7 kg/h)}$$

$$\text{Presión total} = 16 \text{ mmHg} = 230 \text{ mmca}$$

$$\text{Aceleración de la gravedad} = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$\text{Potencia}_{\text{ventilador}}(W) = Q \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right) * P (\text{mmca}) * g \left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)$$

$$Potencia_{ventilador}(W) = 0,51 * 230 * 9,81 = 1\ 150\ W = 1,15\ kW$$

Tensión del motor eléctrico = 220 v.

Intensidad de corriente = 4,2 amperios

$$Potencia_{motor\ elec.\ vent.}(W) = 0,9 * \sqrt{3} * 220 * 4,2 = 1\ 474\ W = 1,474 = 1,5\ kW$$

Por lo tanto, la eficiencia del motor eléctrico del ventilador de aire es igual a:

$$Ef_{ventilador} = \frac{1,15}{1,474} * 100\% = 78\ \%$$

El ventilador de aire de dilución para ser utilizado en la cámara de secado es de 78 %, caudal de 0,51 m³/s , presión total de 16 mmHg y temperatura desde 20 °C hasta 300 °C.

b. Balance en el proceso de secado.

Dimensiones de la cámara de secado:

Largo: 24 metros

Ancho: 10 metros

Altura: 3 metros.

La madera es un material higroscópico, lo que significa que es un material que absorbe agua. El agua penetra en la madera de tres formas diferentes: en forma líquida, a través de los lúmenes de las células mediante tensión capilar; en forma de vapor, a través de los lúmenes de las células; o mediante difusión molecular, a través de las paredes celulares. El contenido de humedad de la madera representa la relación entre la masa de agua que contiene y la masa de madera sin agua. (Es decir, si un trozo de madera de 100 kg contiene 50 kg de agua, el porcentaje de humedad es del 50 %). En un uso normal, el contenido de humedad de la madera oscila entre el 8 % y el 25 % según su peso, dependiendo de la humedad relativa del aire.

Se tienen un total de:

400 tablonces de un peso cada uno de ellos de 96 kg (Cada uno de 6 m*0,4 m*4")

El peso del tablón promedio se obtiene en función del valor de la densidad 400 kg/m³.

$$\text{Peso tablon} = (6 \text{ m} * 0,4 * 0,1 \text{ m} * 400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}) = 96 \text{ kg}$$

Humedad de entrada de la madera luego del secado natural, es de 25 %.

Humedad final de la madera luego del secado artificial con aire caliente con sistema convencional igual a 10 %

Los tablonces están apilados en rumas de:

20 hileras de tablonces a lo alto.

Cada hilera tiene espaciados entre si 7 tablonces de 0,4 m (16"), en un largo total de 6,0 metros y 6,0 metros a lo ancho.

La altura total de los tablonces apilados es de 2,0 m.

Cada ruma tiene un peso de:

$$\text{Peso ruma} = 7 * 20 * 96 \frac{\text{kg}}{\text{tablon}} = 13\,440 \text{ kg}$$

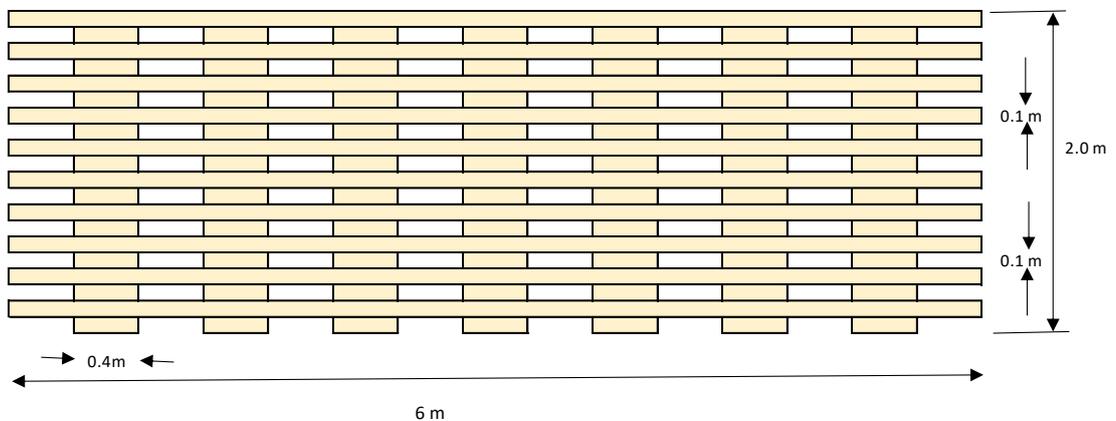


Figura 17 Apilado de la madera húmeda para el proceso de secado

Se tiene con un total de 2 rumas, sumando un peso promedio de madera de 26 880 kg.

En un balance de masas se tiene para la madera a secar el siguiente calculo:

Lote de Madera entrante: 26 880 kg

Humedad inicial = 25 % (Masa de agua contenida = 6 720 kg)

Madera entrante = 75% (Madera solida = 20 160 kg)

Lote de Madera saliente luego del batch de secado: 4 000 kg

Madera saliente = 90% (Madera solida = 20 160 kg)

Humedad final= 10 % (Masa de agua contenida = 2 240 kg)

Humedad liberada luego del proceso de secado:

$$\text{Masa de agua liberada} = 6\,720 - 2\,240 = 4\,480 \text{ kg de agua/lote}$$

Seguidamente se determina el flujo de energía requerido para el proceso de secado de madera según la figura N° 18 y las ecuaciones 18,19,20, 21 y 22 definidas en el capítulo II.

El Calor sensible este compuesto por el flujo de calor de aire caliente necesario para incrementar la temperatura desde 20°C hasta la temperatura de secado de 60 °C. Para un calor específico de la madera igual a 1,76 kcal/kg°C.

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{u1} &= 26\,880 \frac{\text{kg}}{\text{lote}} * 1,76 \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^\circ\text{C}} * (60 - 20)^\circ\text{C} = 1\,892\,352 \frac{\text{Kj}}{\text{lote}} \\ &= 452\,715,8 \text{ kcal/lote}\end{aligned}$$

Del mismo modo una vez alcanzada la temperatura de inicio de secado, el flujo de energía adicional debe provocar la separación de una fracción de la humedad contenida en la madera. Se tienen dos componentes, la primera que cuantifica el flujo de energía calorífica para calentar la fracción de agua a evaporar contenida en la madera hasta los 100 °C mediante un proceso de variación de calor sensible y el flujo de energía calorífica para evaporar el agua contenido en la madera en un proceso de cambio de calor latente:

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{u2} &= 4\,480 \frac{\text{kg}}{\text{lote}} * 1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg } ^\circ\text{C}} * (100 - 60)^\circ\text{C} + 4\,480 \frac{\text{kg}}{\text{lote}} * 540,2 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \\ &= 2\,599\,296 \text{ kcal/lote}\end{aligned}$$

Δh_{fg} = Entalpia de vaporización del agua a 1 Bar de Presión y 100 °C de temperatura igual a 2 258 kJ/kg = 540,2 kcal/kg.

El cuerpo del secador conformado por las paredes y techo están fabricadas de ladrillo, en un proceso de equilibrio térmico, absorben parte del calor suministrado por el aire caliente.

Se tienen los siguientes datos:

El coeficiente global de transferencia de calor (U) se evalúa según la siguiente ecuación:

$$U = 8,4 + 0,06 * (T_{ext} - T_{amb})$$

De donde:

$T_{ext} = 60$ °C referida a la temperatura exterior de las paredes del secador.

$T_{amb} = 20$ °C es la temperatura del medio ambiente.

$$U = 8,4 + 0,06 * (T_{ext} - T_{amb}) = 8,4 + 0,06 * (60 - 20) = 10,8 \frac{kcal}{m^2 * ^\circ C}$$

Así mismo la Potencia calorífica utilizada para calentar el material conformante del secador se evalúa según la siguiente ecuación 21:

Dónde:

A_{tc} = Es el área lateral de transferencia de calor.

$$A_{tc} = 2 * ((24 * 3) + (10 * 3)) + (24 * 10) = 444 m^2$$

$$\dot{Q}_{u3} = 444 m^2 * 10,8 \frac{kcal}{m^2 * ^\circ C} * (60 - 20)^\circ C = 191 808 kcal/lote$$

En el equilibrio el flujo de aire caliente es igual a la suma de cargas térmicas en la cámara del secador, según la siguiente ecuación de igualdad:

$$\dot{Q}_{ac} = 452 715,8 + 2 599 296 + 191 808 = 3 243 819,8 kcal/lote$$

Seguidamente se determina el periodo de lote de secado con aire convencional utilizando como combustible Petróleo BD5.

El flujo de calor disponible es igual a la suma de:

$$\dot{Q}_{disponible} = \dot{Q}_{GC} + \dot{Q}_{AD}$$

$$\dot{Q}_{disponible} = 15 218,9 + 114 041,5 = 129 260,4 kcal/h$$

$$\text{Duracion proceso de secado} = \frac{3 249 260,4 \frac{kcal}{lote}}{129 260,4 \frac{kcal}{h}} = 25,13 h/lote$$

Se tiene una duración del proceso de secado de 25,13 horas, periodo de tiempo en el cual el quemador de petróleo BD5 se encuentra combustionando y generando el flujo

de calor para producir el aire caliente de dilución para el proceso de secado. Para un proceso de secado es un tiempo de secado por lote muy veloz, teniendo en cuenta los tiempos para periodos de secado artificial superan las 18 horas para conseguir una mejor liberación de la humedad contenida en la madera.

Seguidamente se determinan los indicadores de desempeño energético técnico y económico.

Consumo de combustible por lote:

$$\text{Consumo BD5} = 4 \frac{\text{galones}}{\text{hora}} * 25,13 \frac{\text{hora}}{\text{lote}} = 100,52 \frac{\text{Galones Petroleo BD5}}{\text{lote}}$$

$$\text{IDE}_{\text{tecnico1}} = \frac{100,52 \frac{\text{Galones de Petroleo BD5}}{\text{lote}}}{4\,480 \frac{\text{kg de agua evaporada}}{\text{lote}}} = 0,0224 \frac{\text{Galones Petroleo BD5}}{\text{kg de agua evaporada}}$$

$$\text{IDE}_{\text{tecnico1}} = 22,4 \frac{\text{Galones Petroleo BD5}}{\text{Ton. de agua evaporada}}$$

Expresando el indicador de desempeño energético en unidades de flujo de energía.

$$\begin{aligned} \text{IDE}_{\text{tecnico2}} &= 22,4 \frac{\text{Galones Petroleo BD5}}{\text{Ton. de agua evaporada}} * 3,29 \frac{\text{kg}}{\text{Galon Petroleo BD5}} * 9\,860 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \\ &= 726\,642,6 \frac{\text{kcal}}{\text{Ton de agua evaporada}} \end{aligned}$$

Expresando el indicador de desempeño energético en función de la energía eléctrica consumida:

Del mismo modo se cuenta con un motor eléctrico de 1,5 kW para el ventilador de aire de dilución.

Energía eléctrica consumida para un lote de secado es igual a:

$$\text{Energia electrica consumida} = 25,13 \frac{\text{horas}}{\text{lote}} * 1,5 \text{ kW} = 37,7 \frac{\text{kWh}}{\text{lote}}$$

$$IDE_{\text{tecnico3}} = \frac{37,7 \frac{\text{kWh}}{\text{lote}}}{4\,480 \frac{\text{kg de agua evaporada}}{\text{lote}}} = 0,0084 \frac{\text{kWh}}{\text{kg de agua evaporada}}$$

$$IDE_{\text{tecnic32}} = 8,4 \frac{\text{kWh}}{\text{Ton de agua evaporada}}$$

Costo de combustible puesto en planta, teniendo un precio de planta de 10,5 Soles/Galón Petróleo BD5

$$IDE_{\text{economico1}} = 22,4 \frac{\text{Galones Petroleo BD5}}{\text{Ton de agua evaporada}} * 10,5 \frac{\text{Soles}}{\text{Galon Petroleo BD5}}$$

$$IDE_{\text{economico1}} = 235,2 \frac{\text{Soles}}{\text{Ton. de agua evaporada}}$$

Seguidamente se determina el indicador de desempeño energético económico asociado al consumo de energía eléctrica con una tarifa eléctrica BT5 NR, con un costo de 0,69 S./kWh.

$$\begin{aligned} IDE_{\text{economico 2}} &= 8,4 \frac{\text{kWh}}{\text{Ton de agua evaporada}} * 0,69 \frac{\text{Soles}}{\text{kWh}} \\ &= 5,79 \frac{\text{Soles}}{\text{Ton de agua evaporada}} \end{aligned}$$

Para la determinación de los indicadores de desempeño energético ambiental, para el petróleo BD5 se toma el factor de emisiones igual a 70,8 Ton CO₂/ TJ.

$$\begin{aligned} IDE_{\text{ambiental 1}} &= 726\,642,6 \frac{\text{kcal}}{\text{Ton de agua evaporada}} * 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kcal}} * \frac{1 \text{ TJ}}{10^9 \text{ KJ}} \\ &* 70,8 \frac{\text{Ton CO}_2}{\text{TJ}} = 0,215 \frac{\text{Ton CO}_2}{\text{Ton de agua evaporada}} \end{aligned}$$

4.2 Aspectos constructivos y balance de energía en horno para aserrín.

a. Con respecto al hogar.

La forma de la parrilla va a estar determinada por la forma de la cámara de combustión, la cual es cuadrada. Las dimensiones definidas para la parrilla son:

Largo: $L = 0,60 \text{ m}$

Profundidad: $P = 0,60 \text{ m}$

Área: $A = 0,36 \text{ m}^2$

Mientras que las dimensiones internas del horno son de

Largo: $1,0 \text{ m}$

Profundidad: $P = 1,0 \text{ m}$

Altura: $h = 0,80 \text{ m}$.

Se tiene un factor de:

$$177,0 \frac{\text{kg de aserrín}}{h} \text{ para una parrilla con un área de } 0,36 \text{ m}^2$$

En el proceso constructivo se habilito el hogar con ladrillo silico aluminoso standard de 8" *4" *4" colocados de costado, elaborados con materiales de alta pureza capaces de resistir temperaturas superiores a los 2 300°F hasta los 3 000°F. Se caracterizan por la baja conductividad del calor, alta resistencia a la compresión en frío, resistencia a la deformación por altas temperaturas y por su dimensionamiento preciso. Se hizo uso de un total de

El área total del hogar es igual a:

$$Area_{horno} = 2 * ((0,8 * 0,8) + (0,8 * 0,8)) + (0,8 * 0,8) = 3,2 \text{ m}^2$$

Como aglutinante y sellador se hizo uso de cemento refractario 1 000 BBQ (10 bolsas de 5 kg cada uno incluido el acabado externo) mezclado con arena fina y agua, la fragua soporta temperaturas de hasta 1 500 °C, y es ideal su uso para Ideal para instalación en paredes, enchapes de parrillas, chimeneas, hornos de pollerías, hornos de panificación fijos y hornos rodantes, e incineradores. El Rendimiento de la bolsa de cemento refractario es de 20 m² por bolsa.

En la figura siguiente observa en la fase constructiva interna del horno y el tabique donde se apoya la parrilla para la combustión de aserrín.



Figura 18 Aspectos constructivos del horno para combustión de aserrín.

Con respecto a la parrilla se construyó con plancha de acero inoxidable de 1/16", DIN 2527 PN 10 de Calidad AISI 316 de baja conductividad térmica y resistencia a la fatiga a alta temperatura de dimensiones de 0,6 * 0,6 de largo y ancho respectivamente, dándole una holgura de 0,2 m por cada lado para que la plancha se apoye sobre el piso del horno. La parrilla es estática durante el proceso de combustión, pero no se mantiene fija sobre la base del horno, con lo cual puede ser retirada de su ubicación para mantenimiento de la parrilla y el horno.

Sobre la plancha de acero se realizó incisiones con cuchilla fresadora de 1/8" de diámetro. Se realizaron un total de 20 incisiones a lo largo y 20 incisiones a lo ancho según el siguiente detalle constructivo.

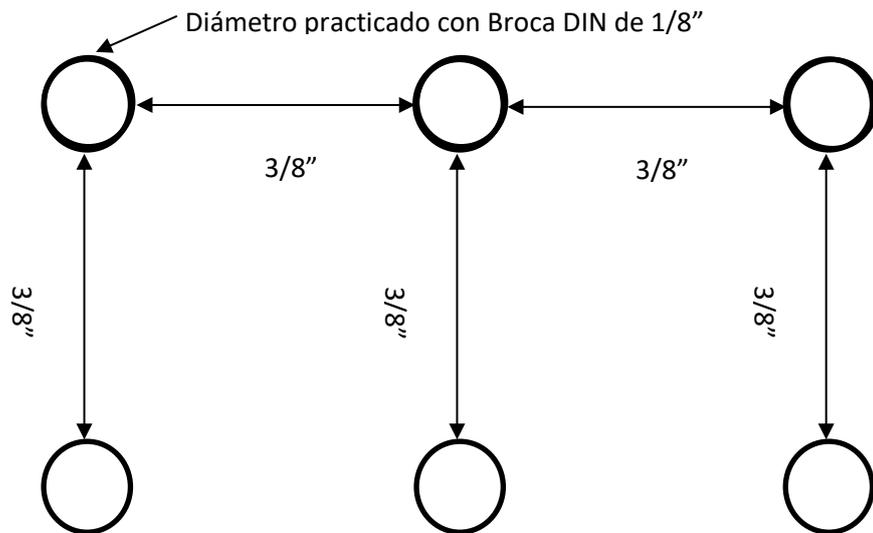


Figura 19 Aspectos constructivos de la parrilla para combustión del aserrín.

Se hace notar que se realizó pruebas con parrillas las cuales tenían diversas separaciones, de lo cual se comenta lo siguiente:

- Para incisiones con separaciones menores a $3/8''$, se comprobó que el aserrín permanecía poco tiempo en la parrilla, debido al poco espacio entre agujeros.
- En el caso de tener separaciones mayores a $3/8''$, se comprobó que mucha parte del aserrín permanecía en forma de ceniza luego de combustionar y no se podía expulsar hacia la tolva de cenizas, para lo cual era frecuente remover las cenizas de forma manual, para provocar su caída a la tolva de cenizas.
- Mientras que los agujeros practicados con brocas de $1/16''$ HSS, tuvieron inconvenientes de realizarlas, debido al espesor de plancha, y mucho más aun en periodos de cuarentena es muy difícil conseguir este tipo de broca, por lo cual se decidió trabajar con brocas de $1/8''$ HSS.

b. Con respecto a la alimentación de combustible y aire de la combustión.

Con respecto a la alimentación de combustible.

Tomando en cuenta un proceso de alimentación de aserrín de 78 kg/h, y así mismo teniendo referencia una autonomía de 1 hora, se construyó el tolván de almacenamiento

de aserrín que permite la alimentación del mismo a la parrilla del horno. Para lo cual se tiene los siguientes datos:

Densidad del aserrín 197 kg/m³(según Tabla N° 03)

$$\text{Volumen de tolva} = 177 \frac{\text{kg de aserrin}}{h} * 1 \text{ hora} * \frac{1 \text{ m}^3}{197 \text{ kg de aserrin}} = 0,898 \text{ m}^3$$

Las dimensiones de la tolva de aserrín de forma de un tronco de pirámide son las siguientes:

Base mayor: (Parte superior)

Largo = 1,2 m Ancho = 1,2 m Area_{BM} = 1,44 m²

Base menor: (parte inferior)

Largo = 0,4 m Ancho = 0,4 m Area_{bm} = 0,16 m²

Altura de tronco de pirámide. h = 0,8 m.

$$\text{Volumen de tolva} = \frac{h}{3} * (\text{Area}_{\text{BM}} + \text{Area}_{\text{bm}} + \sqrt{\text{Area}_{\text{BM}} * \text{Area}_{\text{bm}}}) = 0,45 \text{ m}^3$$

$$\text{Autonomia} = \frac{0,898}{0,45} = 0,5 \text{ horas}$$



Figura 20 Diseño final de tolvin de alimentación de aserrín

Del mismo modo se dimensiono el transportador helicoidal para el suministro de aserrín desde el tolván hacia la parrilla de combustión de aserrín.

La potencia requerida para operar un transportador helicoidal se basa en una instalación adecuada, en una alimentación regular y uniforme del material al transportador y en otros criterios de diseño que se tomaran en función al Manual Martin para diseño de transportadores helicoidales (<http://sopetra.com.br/view/catalogo/transportadores-helicoidais-completos-catalogo.pdf>)

La potencia requerida es la suma de la potencia necesaria para vencer la fricción (HPf) y la potencia necesaria para mover el material dentro del transportador a la capacidad especificada (HPm) multiplicada por el factor de sobrecarga Fo y dividido entre la eficiencia total de la transmisión (e). Se tiene el siguiente procedimiento:

Potencia para accionar el transportador helicoidal vacío:

$$HPf = \frac{L * N * F_d * f_b}{1\ 000\ 000}$$

Potencia para mover el material:

$$HPm = \frac{C * L * W * F_f * F_m * F_p}{1\ 000\ 000}$$

Potencia total de accionamiento:

$$HP_{total} = \frac{(HPf + HPm) * F_o}{e}$$

Los siguientes factores determinan la potencia requerida de un transportador helicoidal:

L = Longitud total del transportador, en pies. (12 pies para nuestro caso)

N = Velocidad de Operación, RPM (Se asume una velocidad de 10 rpm para transmisión lenta).

F_d = Factor del diámetro del transportador (Ver Anexo 5). Igual a un valor a 55, teniendo en cuenta que el diámetro del helicoide es de 12".

F_b = Factor del buje para colgante (Ver Anexo 5). Esta referido al apoyo que tendrá el transportador helicoidal en este caso tendrá dos cojinetes de pared con rodamiento de bolas, con el cual el factor del buje para colgante es igual a 1.

C = Capacidad en pies cúbico por hora. Se tiene un flujo masico de 177 kg de aserrín/hora, para una densidad de 197 kg/m^3 , se tiene un equivalente a $34,93 \text{ pies}^3/\text{h}$.

W = Densidad del material en libras por pie cúbico. La densidad promedio del aserrín es de 197 kg/m^3 igual a $12,6 \text{ Lbm/pe}^3$.

F_r = Factor de helicoidal (Ver Anexo 5). Se tiene una geometría helicoidal con corte y doblez a un porcentaje de carga del transportador de 45 %, con un valor igual a 1,7.

F_m = Factor de material (Ver Anexo 5). Se tiene un factor de 1,4 para el aserrín,

F_p = Factor de las paletas (cuando se requieran) No se utiliza debido a que los discos del transportador helicoidal no tendrán paletas adicionales, se tiene por lo tanto un factor de paletas igual a 1.

F_o = Factor de sobrecarga. Se determina gráficamente en función a la suma de HP_f y HP_m (Ver Anexo 5).

e = Eficiencia de la transmisión, se utilizará un motorreductor con transmisión con cadenas, con un valor de la eficiencia de transmisión igual a 0,85. (Ver Anexo 5)

Reemplazando valores:

Potencia para mover el material:

$$HP_m = \frac{34,93 * 55 * 12,6 * 1,7 * 1,4 * 1}{1\ 000\ 000} = 0,057$$

Potencia para accionar el transportador helicoidal vacío:

$$HP_f = \frac{8 * 55 * 31 * 1}{1\ 000\ 000} = 0,013$$

Potencia total de accionamiento:

F_o = Factor de sobrecarga. Se determina gráficamente en función a la suma de HP_f y HP_m el cual es igual a 3. (Ver Anexo).

$$HP_{total} = \frac{(0,057 + 0,013) * 3}{0,85} = 0,247 \text{ HP}$$

Se tomará un motor de 0,5 HP, el cual es un motor comercial que puede ajustarse a los requerimientos del suministro de aserrín.

Por lo tanto, una potencia de 0,5 HP = 375 W.



Figura 21 Vista de transportador helicoidal adaptado

Con respecto a la alimentación de aire.

Se tiene un flujo de aire de 4,17 kg de aire/kg de aserrín. Se considera un exceso de aire máximo de 60 % para una buena combustión de combustibles sólidos.

$$\text{Flujo de aire de combustion} = 4,17 \frac{\text{kg de aire}}{\text{kg de aserrin}} * 177 \frac{\text{kg de aserrin}}{\text{hora}} * 1,6 = 1\ 180 \frac{\text{kg aire}}{\text{hora}}$$

La potencia del ventilador de aire de la combustión se determina según el siguiente calculo:

Caudal de aire:

$$\text{Caudal de aire} = 1\ 180 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * \frac{\text{m}^3}{1,21 \text{ kg}} * \frac{1 \text{ h}}{3\ 600 \text{ sg}} = 0,27 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Presión total para quemadores de muy baja potencia = 230 mmca = 16 mmHg.

Aceleración de la gravedad = 9,81 m/sg²

$$\text{Potencia}_{\text{ventilador}}(W) = Q \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) * P (\text{mmca}) * g \left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)$$

$$\text{Potencia}_{\text{ventilador}}(\text{W}) = 0,27 * 230 * 9,81 = 610 \text{ W} = 0,61 \text{ kW}$$

Para una eficiencia del ventilador de baja potencia de 80 %, se determina la potencia eléctrica suministrada.

$$\text{Potencia}_{\text{motor elec.vent.}}(\text{W}) = \frac{0,61 \text{ kW}}{0,8} = 0,762 \text{ kW} = 1 \text{ HP}$$

El ventilador de aire de la combustión para ser utilizado en la parrilla de combustión de aserrín tendrá una eficiencia de 80 %, caudal de 0,27 m³/s, presión total de 16 mmHg y temperatura de 20 °C.

c. Balance de energía en al horno para aserrín.

Seguidamente se presenta los resultados de la combustión en el hogar de aserrín.

Calor aportado por el combustible:

Para un poder calorífico del aserrín proveniente de la madera tornillo igual a 4 798 kcal/kg (Tabla N° 05)

$$\dot{Q}_1 = 177 \frac{\text{kg aserrin}}{\text{h}} * 4 798 \frac{\text{kcal}}{\text{kg } ^\circ\text{C}} = 849 246 \text{ kcal/h}$$

Se realizo valores de medición de temperatura a la salida del horno donde se combustiona el aserrín en parrilla, obteniéndose valores de 800 °C (Valor promedio medido con pirómetro digital)

Por ecuación de continuidad en el horno se cumple lo siguiente:

Flujo de gases de la combustión saliente del horno:

$$m_{GC} = 177 \frac{\text{kg aserrin}}{\text{h}} + 1 180 \frac{\text{kg aire}}{\text{h}} = 1 357 \frac{\text{kg gases}}{\text{h}}$$

Del mismo modo se tiene un Flujo de calor útil en la chimenea del horno:

$$\dot{Q}_{Gc} = 1\,357 \frac{\text{kg gases}}{\text{h}} * 0,249 \frac{\text{kcal}}{\text{kg } ^\circ\text{C}} * (800 - 20)^\circ\text{C} = 263\,556,6 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

Se presenta el resultado de la eficiencia de la combustión en el hogar con parrilla para la combustión de aserrín.

$$\text{Eficiencia de combustión del aserrín} = \frac{263\,556,6 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}}{849\,246 \text{ kcal/h}} * 100 \% = 31 \%$$

4.3 Estado del Arte para la generación de aire caliente.

- a. **Condiciones de mezcla:** Según la ecuación de cantidad se tienen dos flujos que se mezclan a la salida de la chimenea del hogar con parrilla donde se combustiona el aserrín.

Para el flujo de gases de la combustión:

Temperatura de entrada = 800 °C

Temperatura final de gases de combustión = 180 °C

Flujo de gases calientes = 598 kg gases/h

Para el flujo de aire caliente:

Temperatura de entrada = 20 °C

Temperatura final = 180 °C

Flujo de aire caliente= ¿?

En el equilibrio y por continuidad se tiene que:

$$\dot{Q}_{gc} = \dot{Q}_{ac}$$

$$1\,357 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * 0,249 \frac{\text{kcal}}{\text{kg } ^\circ\text{C}} * (800 - 180)^\circ\text{C} = \dot{m}_{ac} * 0,249 \frac{\text{kcal}}{\text{kg } ^\circ\text{C}} * (180 - 20)^\circ\text{C}$$

$$\dot{m}_{ac} = 5\,258 \text{ kg/h}$$

Se tiene flujo de aire caliente disponible de:

$$\dot{m}_{acD} = 1\,357 + 5\,258 = 6\,615 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \text{ a } 120\text{ }^{\circ}\text{C}$$

El valor del caudal de aire entrante es de:

$$\dot{Q}_{acD} = 6\,615 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * \frac{\text{m}^3}{1,21 \text{ kg}} * \frac{1 \text{ h}}{3\,600 \text{ s}} = 1,51 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Seguidamente se presenta el ventilador de tiro forzado el cual suministra el aire que se calentara diluyendo los gases de la combustión hasta un valor de 120 °C. Se tiene un total de 6 ductos para el suministro de aire a temperatura ambiental que se mezcla con los gases calientes de la combustión.

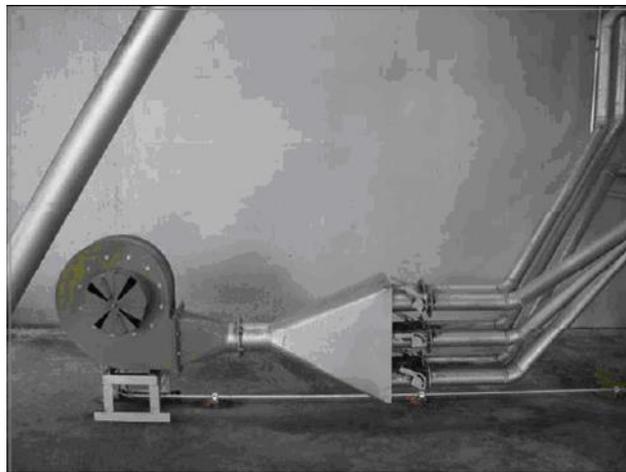


Figura 22 Vista de ventilador de aire

Los 06 puntos de inyección de aire se distribuyen a lo largo de la chimenea del horno con parrilla para la combustión de aserrín, diluyéndose por etapas con los gases de la combustión alcanzando la temperatura de equilibrio de 120 °C. El diámetro de la chimenea es de 0,4 m.

En el aspecto constructivo la inyección de aire se ha realizado en tubería de acero inoxidable de 2 1/2", con la finalidad de que el flujo de aire entrante se diluya en etapas con los gases de la combustión generado en el horno de parrilla de combustión de aserrín.

Las condiciones de suministro de aire son las siguientes:

Caudal de suministro de aire :1,51 m³/s

Presión total: 240 mmca (Valor superior a 230 mmca, con el cual se inyecta el aire de para la combustión del aserrín)

Aceleración de la gravedad: 9,81 m/s².

$$\text{Potencia ventilador de aire} = 1,51 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 240 \text{ mmca} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 3\,555,5 \text{ W}$$

Para una eficiencia del 80 % del ventilador se tiene una potencia eléctrica de:

$$\text{Potencia motor de ventilador de aire} = \frac{3\,555,5}{0,8} = 4\,443,9 \text{ W} = 4,5 \text{ kW}$$

Del mismo modo se calculó el valor de la velocidad del aire en cada uno de los 06 puntos de inyección.

Diámetro de tubería = 0,0254 * 2 ½ = 0,0635 mm

Caudal = 1,51 m³/s / 6 = 0,251 m³/s.

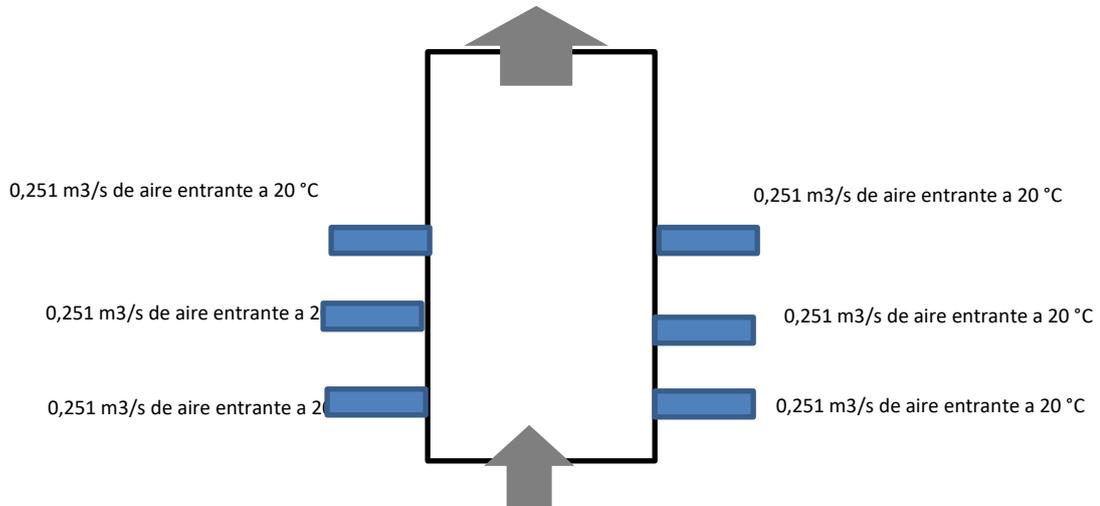
$$\text{velocidad del aire} = 0,251 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * \frac{4}{3,1416 * (0,0635)^2 \text{ m}^2} = 79,25 \text{ m/s}$$

Se considera el diseño de suministro de aire de dilución de alta velocidad (mayor a 12 m/s) con lo cual se consigue una mezcla homogénea del aire caliente y los gases de la combustión, del mismo modo la velocidad del aire provoca el impulso necesario para que los gases de la combustión y el aire se mezclen adecuadamente hasta antes de llegar a la cámara de secado.

Del mismo se ha evaluado el valor de temperatura al final de la última fila de puntos de inyección, alcanzándose temperatura promedio de 400 °C. Este valor de temperatura se homogeniza hasta 180 °C a la entrada de la cámara de secado.

Luego de una determinada distancia en el ducto de aire caliente hacia la cámara de secado, este valor se estabiliza a un valor de 180 °C

6 615 kg/h de gases de combustión diluidos en aire caliente a 400°C rumbo al ducto de alimentación de la cámara de secado.



1 357 kg/h de gases de combustión a 800 C provenientes de horno con parrilla para combustión de aserrín

Figura N°23 Distribución de flujos aire entrante en chimenea del horno

4.4 Balance de aire en el proceso de secado con aire caliente generado por combustión de aserrín.

Se tiene un flujo útil de aire caliente de 4 644,4 kg/h a una temperatura de 120 °C, la cual ingresa a la cámara de secado cediendo su valor sensible hasta una temperatura de 105 °C (5 °C sobre el valor 100 °C, valor de temperatura donde ocurre el secado de la madera)

El flujo de calor disponible del aire caliente es:

$$\dot{Q}_{acD} = 6\,615 \frac{kg}{h} * 0,249 \frac{kcal}{kg\,^{\circ}C} * (180 - 105)^{\circ}C = 123\,535\, kcal/h$$

Según el ítem de balance de energía en la cámara de secado se tiene que el flujo de calor necesario es de:

$$\dot{Q}_{ac} = \dot{Q}_{Secado} = 452\,715,8 + 2\,599\,296 + 191\,808 = 3\,243\,819,8 \text{ kcal/lote}$$

Seguidamente se determina el periodo de lote de secado con aire caliente proveniente de la combustión de aserrín.

$$\text{Duracion proceso de secado} = \frac{3\,243\,819,8 \frac{\text{kcal}}{\text{lote}}}{123\,535 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}} = 26,25 \text{ h/lote}$$

Se presentan los cálculos para la duración del proceso de secado en función de la temperatura de generación de aire caliente para diversas pruebas de dilución del aire con gases de la combustión provenientes de la combustión de aserrín.

Tabla 09 Duración del proceso de secado en función al flujo de aire caliente y 1 357 kg/h de gases de combustión a 800 °C

Temperatura de aire caliente	Flujo masico aire caliente	Flujo de ac+gc	Potencia motor Ventilador	Velocidad aire diluir	Flujo de calor aprov. Secado	Duración Secado
°C	kg/h	kg/h	kW	m/s	kcal/h	Hora/lote
180	5 258	6 615	4,5	79,25	123 535	26,26
160	6 203	7 560	5,1	91,34	103 540	31,33
140	7 464	8 821	6,0	106,57	76 871	42,20
120	9 228	10 585	7,2	127,88	39 533	82,05

Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar de la tabla anterior lo siguiente:

- A medida que se incrementa el valor de la temperatura del aire caliente con los gases de la combustión provenientes de la combustión de aserrín, se tiene un menor flujo compuesto por el aire caliente y los gases de la combustión, consiguiéndose del mismo modo una menor potencia del motor eléctrico que impulsara el aire caliente y los gases de la combustión. Del mismo modo la velocidad del aire de entrada a través de los puntos de inyección de la chimenea cuenta con un menor de velocidad de flujo en comparación a otros valores evaluados al mismo diámetro de tubería de aire,

- Del mismo modo el periodo de secado es mucho menor cuando se tiene una mayor temperatura de mezcla entre el aire caliente y los gases de la combustión con un valor de 6.56 horas/lote del proceso de secado.

Del mismo modo se determinan los indicadores de desempeño energético para el proceso de secado de madera.

Seguidamente se determinan los indicadores de desempeño energético técnico, económico y ambiental.

Consumo de combustible por lote:

$$\text{Consumo Aserrin} = 177 \frac{\text{kg aserrin}}{\text{hora}} * 26,26 \frac{\text{hora}}{\text{lote}} = 4\,648 \frac{\text{kg aserrin}}{\text{lote}}$$

$$\text{IDE}_{\text{tecnico1}} = \frac{4\,648 \frac{\text{kg aserrin}}{\text{lote}}}{4\,480 \frac{\text{kg de agua evaporada}}{\text{lote}}} = 1,038 \frac{\text{kg de aserrin}}{\text{kg de agua evaporada}}$$

$$\text{IDE}_{\text{tecnico1}} = 1,038 \frac{\text{Ton. de aserrin}}{\text{Ton. de agua evaporada}}$$

El indicador de desempeño energético se evalúa en función al flujo de energía calorífica suministrada:

$$\begin{aligned} \text{IDE}_{\text{tecnico2}} &= 1,038 \frac{\text{kg de aserrin}}{\text{kg. de agua evaporada}} * 4\,798 \frac{\text{kcal}}{\text{kg aserrin}} \\ &= 4\,980,3 \frac{\text{kcal}}{\text{kg de agua evaporada}} \\ &= 4\,980,300 \frac{\text{kcal}}{\text{Ton de agua evaporada}} \end{aligned}$$

El aserrín es un subproducto obtenido de la habilitación de la madera, el indicador de desempeño está asociada al consumo de energía eléctrica por lote de secado.

Consumo de energía eléctrica en motores eléctricos a una Tarifa BT5B NR (No residencial)

Se tienen los siguientes motores eléctricos asociados a la operación:

Motor de aire de combustión= 0,762 kW

Motor de transportador helicoidal= 0,375 kW

Motor de aire para secado =4,5 kW

Tiempo de operación = 6,56 horas / lote

Energía consumida = 6,56*(0,762+0,375+4,5) = 36,97 kWh

Del mismo para el Indicador de desempeño energético, se evalúa en función a la energía eléctrica consumida:

$$IDE_{\text{tecnico3}} = \frac{36,97 \frac{\text{kWh}}{\text{lote}}}{4\,480 \frac{\text{kg de agua evaporada}}{\text{lote}}} = 8,25 \frac{\text{kWh}}{\text{Ton de agua evaporada}}$$

Del mismo el aserrín es un subproducto que se obtiene del habilitado de la madera y se comercializa con un precio de S/ 10 soles bolsa de 100 kg de aserrín.

$$IDE_{\text{economico1}} = 1,038 \frac{\text{Ton de aserrin}}{\text{Ton. de agua evaporada}} * \frac{10 \text{ Soles}}{100 \text{ kg de aserrin}} * \frac{1\,000 \text{ kg aserrin}}{1 \text{ Ton de aserrin}}$$

$$IDE_{\text{economico1}} = 103,8 \frac{\text{Soles}}{\text{Ton de agua evaporada}}$$

Para un costo de energía eléctrica para una tarifa BT5 NR = 0,67 S/. /kWh.

$$IDE_{\text{economico2}} = 8,25 \frac{\text{kWh}}{\text{Ton de agua evaporada}} * 0,67 \frac{\text{S/}}{\text{kWh}}$$

$$IDE_{\text{economico2}} = 5,52 \frac{\text{Soles}}{\text{Ton. de agua evaporada}}$$

Del mismo modo se tiene un factor de emisiones para desechos de madera de 112 Ton CO₂/TJ (Fuente: Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero - Volumen 2: Energía, pág. 2.16 - 2.17

$$IDE_{\text{ambiental}} = 4\,980,3 \frac{\text{kCal}}{\text{kg de agua evaporada}} * 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{Kcal}} * \frac{1 \text{ TJ}}{10^9 \text{kJ}} * 112 \frac{\text{Ton CO}_2}{\text{TJ}}$$

$$IDE_{\text{ambiental}} = 0,00223 \frac{\text{Ton CO}_2}{\text{kg de agua evaporada}} = 2,23 \frac{\text{Ton CO}_2}{\text{Ton de agua evaporada}}$$

4.5 Benchmarking entre indicadores de desempeño energético.

Seguidamente se presenta el benchmarking o comparativo entre indicadores de desempeño energéticos en evaluación tanto para el IDEn técnico, económico y ambiental, para lo cual esta comparación entre la tecnología de secado con combustión de Petróleo BD5 y la combustión de aserrín para ambos gases para generar aire caliente que diluye los gases de la combustión es la siguiente:

Para el indicador de desempeño energético, el cual se compara en unidades de energía utilizada por lote de secado, este comparativo es más representativo para el indicador de desempeño energético (el cual tiene unidades de consumo distintos para cada combustible). Evaluadas a 4,48 Tonelada de agua evaporada en el proceso de secado (valor que se requiere para cada lote o Batch de secado)

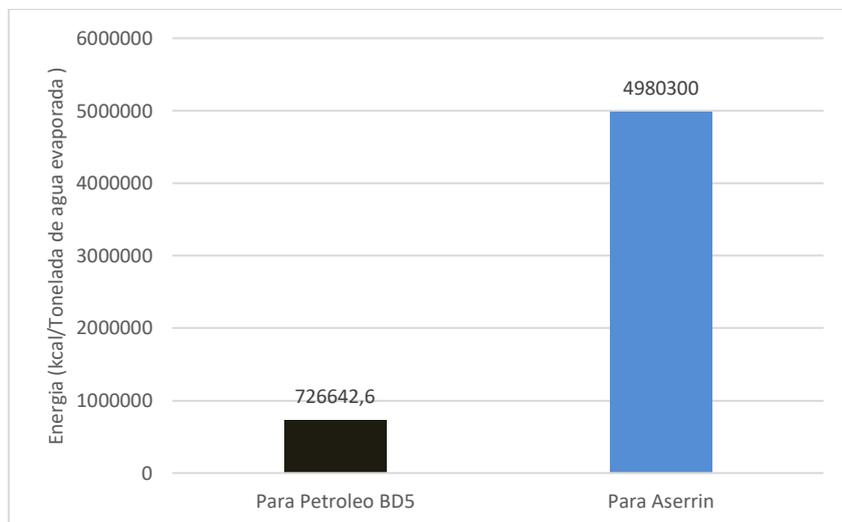


Figura 24 Benchmarking entre IDE técnico 2.

De la figura anterior se tiene el siguiente análisis:

Por lote de secado en la cual se retira de la madera 4,48 Tonelada de agua indistintamente del tipo de combustible, siendo necesario suministrar una mayor cantidad de energía y calor en el caso del uso de aire caliente asociado a la combustión de aserrín. Esto significa agregar 6,85 veces más calor generado con combustión con aserrín con respecto al calor generado por combustión de petróleo BD5.

Así mismo comparando los poderes caloríficos entre ambos combustibles, para el caso del aserrín su poder calorífico es 4 798 kcal/kg, mientras que el valor del combustible líquido petróleo BD5 es de 9 860 kcal/kg, lo que representa un valor de 2,05 veces más el poder del calorífico del petróleo BD5 con respecto a la combustión del aserrín.

Con respecto al benchmarking entre los indicadores de desempeño energético técnico 3 se presenta la siguiente figura:

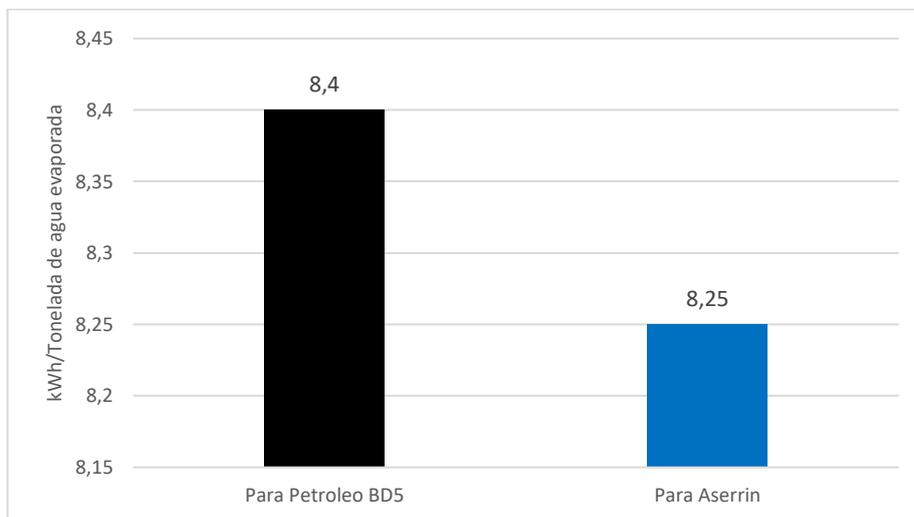


Figura 25 Benchmarking entre IDE técnico 3.

De la figura anterior se tiene el siguiente análisis:

Por el lote de secado en la cual se retira de la madera 4,48 Tonelada de agua indistintamente del tipo de combustible, es necesario un mayor consumo de energía eléctrica en el uso de aire caliente asociado a la combustión de aserrín, debido a una mayor potencia eléctrica de los motores asociados a esta operación. Esto significa

consumir 0,15 kWh/Tonelada de agua evaporada con combustión con petróleo BD5 con respecto al consumo de energía eléctrica por combustión de aserrín.

Con respecto al benchmarking entre los indicadores de desempeño energético económico 1 se presenta la siguiente figura:

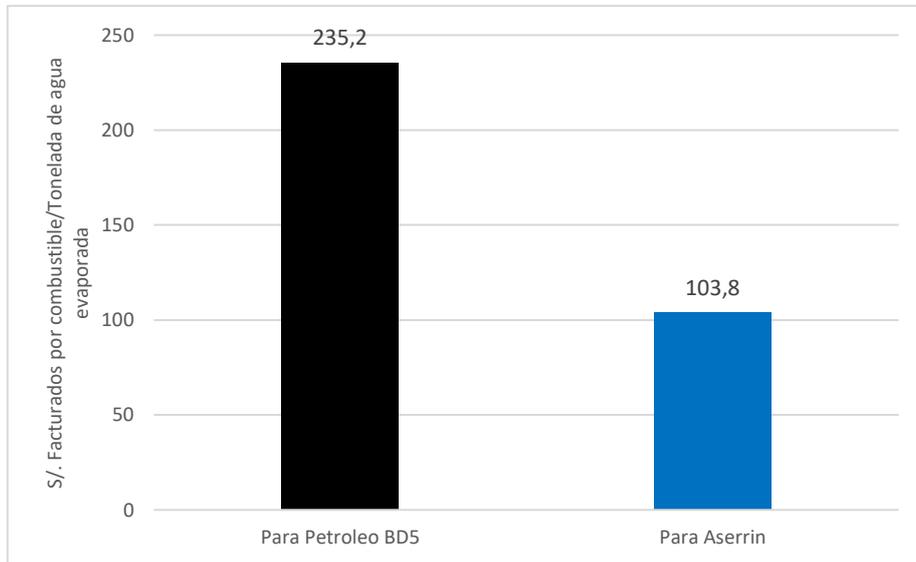


Figura 26 Benchmarking entre IDE económico 1.

Para el lote de secado en la cual se retira de la madera 4.48 Tonelada de agua indistintamente del tipo de combustible, se presenta un mayor costo por compra de combustible petróleo BD5 con respecto a la combustión de aserrín debido al precio del galón de petróleo BD5 con respecto al costo residual del aserrín el cual es un subproducto obtenido del cepillado, corte o maquinado de la madera.

Se factura 2,26 veces más por consumo de petróleo BD5 con respecto al costo por combustión de aserrín.

Para el caso de la figura 28 se presenta el comparativo entre indicadores de desempeño energético económico 2, asociado al costo de facturación de energía eléctrica. Se tiene una mayor facturación por consumo de energía eléctrica en los motores eléctricos asociados a la combustión de petróleo BD5 con respecto a la combustión del aserrín. De tal manera que la facturación por energía eléctrica asociada a la combustión de petróleo

BD5 es mayor en 0,27 S/. / facturación por consumo de energía eléctrica a la facturación de energía eléctrica asociada a la combustión del aserrín.

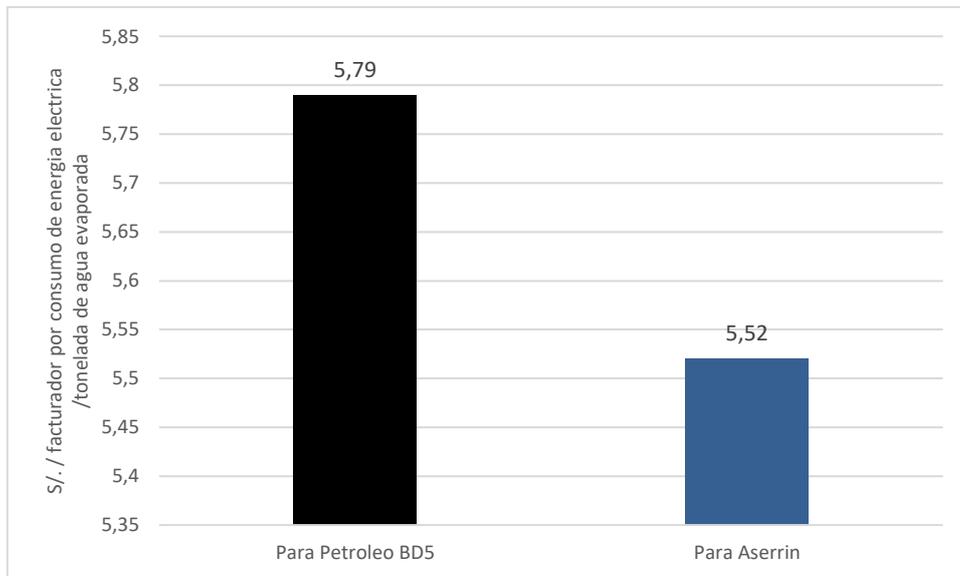


Figura N° 27 Benchmarking entre IDE económico 2

Analizando la totalidad de costos por facturación de energía eléctrica y por combustible se tienen los siguientes indicadores de desempeño energético para cada caso:

IDE económico total con Petróleo BD5: 240,99 S/. / Tonelada de agua evaporada.

IDE económico total con Aserrín: 109,32 S/. / Tonelada de agua evaporada.

Lo que representa que el Indicador de desempeño energético económico total para el Petróleo BD5 es mayor 2,24 veces con respecto al Indicador de desempeño energético económico total para el aserrín.

Se presenta en la figura 29 el benchmarking energético entre los indicadores de desempeño energético ambiental; en el cual se observa que se tiene un mayor valor del IDE ambiental asociado a la combustión de aserrín con un valor de 2,23 Ton. CO₂ emitido/tonelada de agua evaporada, mientras que para la combustión de petróleo BD5 se tiene un valor de 0,215 Ton. CO₂ emitido/tonelada de agua evaporada. Significa que comburiendo aserrín se emite 10,37 veces más CO₂ por batch de secado de madera con respecto a la combustión de Petróleo BD5.

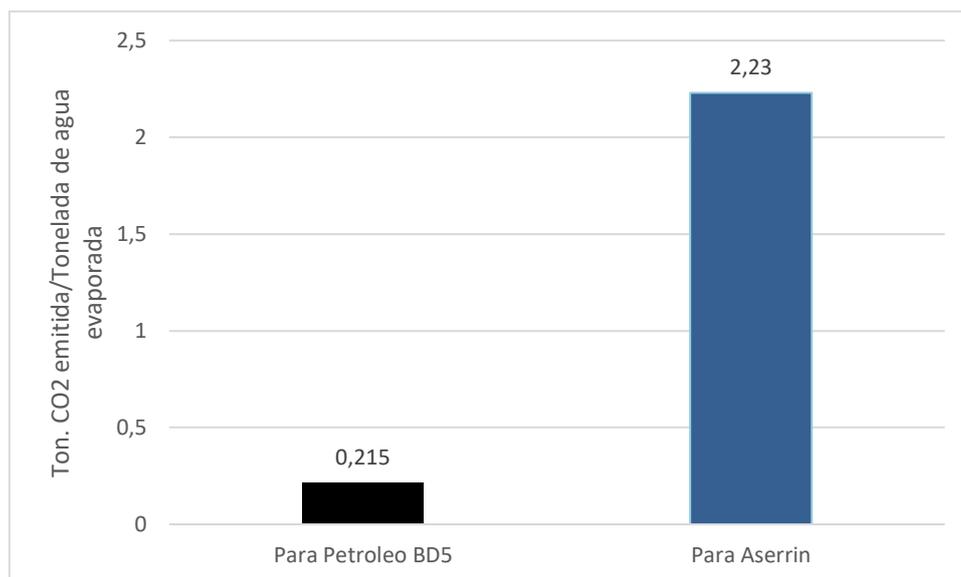


Figura 28 Benchmarking entre IDE ambiental

4.6 Discusión de resultados.

Según los antecedentes del presente informe se presenta la siguiente discusión de resultados:

En el presente informe se ha realizado el análisis de la combustión de aserrín derivado de madera tornillo el cual ha sido combustionado en una parrilla dentro de un horno, al cual se le ha aplicado 60% de exceso de aire (por ser un combustible sólido), se ha evaluado su comportamiento de combustión comparando el calor de reacción que es función de su poder calorífico igual a 4 798 kcal/kg y el cual luego de realizar mediciones promedio de temperatura de combustión se ha obtenido un valor de 800 °C, alcanzándose un rendimiento de la combustión de 31 % ; aunque el estudio no se centró en un estudio de la combustión, se puede manifestar que en el proceso de combustión del aserrín existen factores tecnológicos que deben mejorarse , básicamente en la estabilidad de la combustión sobre la parrilla del horno, mejorar la tecnología de inyección del aire de la combustión, entre otros. El presente informe concuerda con el artículo científico de Pastor y Limache (2017) aplicado a la combustión del aserrín en como combustible en cocinas mejoradas en Pucallpa-Perú en la cual se realizaron pruebas con shihuahuaco (aserrín del cual se presentó una adecuada combustión) y con catahua (del cual se tuvo resultados deficientes en la generación de calor, en este informe tambien se incide en la necesidad de mejorar las condiciones tecnológicas de los hornos de las cocinas mejoradas

para alcanzar una mayor eficiencia de la combustión y manifiesta que ante todo debe realizarse investigaciones referentes a distintos tipos de aserrín para evaluar el comportamiento de sus propiedades físico – mecánicas de cada especie es específica y determinar a través de una bomba de calor las condiciones de la ignición del combustible. Para nuestro estudio y el artículo científico en comparación, en ambos actos se tuvo que provocar el encendido del aserrín con un agente adicional (mecheros) para iniciar la combustión, la cual se demuestra que, una vez iniciada la combustión, este proceso es permanente.

Se diseñó en el horno tomando como referencia el informe realizado por Sedano (2006), las medidas fueron asumidas por los tesisistas (debido a restricciones económicas para construir varios hornos de distintas dimensiones). El horno está recubierto por ladrillo refractario en su totalidad, en la parte inferior consta de una parrilla de plancha de acero inoxidable de 1/16", DIN 2527 PN 10 de Calidad AISI 316 de baja conductividad térmica y resistencia a la fatiga a alta temperatura de dimensiones de 0.6 x 0.6 de largo y ancho aplicando un suministro de combustible de 177 kg de aserrín/hora teniendo como referencia el factor de 62 kg de biomasa/h para una parrilla de 0,126 m² según el estudio realizado por Celleri (2008). Se concuerda con el informe realizado por Sedano (2006) en la secuencia realizada para el dimensionamiento del horno y de los componentes asociados a la combustión. Aunque solo tuvo pérdidas del 40 % en el horno, obteniendo una eficiencia en la combustión del aserrín de 60 %.

En el presente estudio se realizaron los procesos de secado de madera en una cámara de secado a 100 °C un lote de 26 880 kg/h de madera desde una humedad inicial de 25 % hasta una humedad final de 10 % con periodo de secado de 25,13 horas en el caso de la combustión de petróleo BD5 para la generación de aire caliente diluido en gases de la combustión, y con un tiempo de secado de 26,25 horas para el caso de la combustión del aserrín. Se difiere con la tesis realizada por Pinchi (2016) quien realizó estudios combustionado aserrín derivado de cumala en cámaras de aire caliente en la Industria Inversiones La Oroza S.R.L. Loreto – Perú obteniendo en sus resultados con un tiempo de secado de 168 minutos para una carga de 2 000 kg de madera desde 20% a 9 % de humedad.

En la cámara de secado el flujo de aire caliente diluido con gases de la combustión con un flujo de 6 615 kg/h desde una temperatura de 180 °C hasta 105 °C a través de un flujo uniforme en la cámara de secado de 26 880 kg/h de madera liberándose 4 480 kg/h de agua evaporada, en la cámara de secado no se modificó la ubicación de los ventiladores para la remoción del aire caliente (manteniéndose el mismo diseño de la cámara de combustión para ambos combustibles y no se instalaron extractores para provocar depresión en la parte interior de la cámara de secado, más bien el tiro es natural para la extracción de los gases fríos y la humedad liberada por la madera, debido a la baja cantidad de calor suministrada por el aire caliente diluido en gases de la combustión con el cual se alcanzó un batch de secado de 26,25 horas. A diferencia del estudio realizado por Aguilar (2014) en el cual practicó la instalación de un extractor de aire en la cámara de secado, en donde la extracción del aire se realizó a través de ventiladores inducidos por la parte superior, en zonas cercanas por donde se inyectaba el aire caliente con lo cual no se alcanzó un adecuado desempeño del proceso de secado y la utilización del aire caliente.

El presente estudio tuvo en cuenta el proceso de secado de liberar 4 480 kg de agua evaporada de 26 880 kg de madera con humedad del 25 %, esta masa representa un volumen de 4 818 pie³ de madera tornillo (con una densidad 197 kg/m³) utilizando para este caso un total de 6 615 kg/h de aire caliente diluido en gases calientes a 180 °C con un flujo de calor útil de 123 535 kcal/h. A diferencia del estudio realizado por Doerner (2009) quien proyectó una cámara de secado para madera de pino radiata con una capacidad de 1 000 pies³, en donde se controlaron variables como temperatura y humedad relativa del interior de la cámara de secado, en este caso se necesitó una capacidad calórica de 54 000 kcal/h. y como de calefacción se seleccionó serpentines, con vapor saturado a 3,5 kg/cm². Del mismo difiere con Cruz y Luna (2003) quien realizó estudio de secado de madera con un secadero solar para piezas de laurel, con el inconveniente del tiempo de duración del secado que se realizó en 53 días hasta alcanzar una humedad de 15 % con una eficiencia del secador solar del 7%, en el proceso de calentamiento de aire para el proceso de secado.

CONCLUSIONES

- Se realizó un balance de materia y energía inicialmente en el secador de madera teniendo en cuenta las condiciones de operación con petróleo BD5, el cual tiene la capacidad de secar 26 880 kg para un tiempo o batch de secado de 25,13 horas en la cual la humedad de la madera varía desde 25 % hasta 10 %, liberándose un total de 4 480 kg de agua evaporada de la madera. En el proceso de secado se requiere de un flujo de energía calorífica de 3249 260,4 kcal/h, flujo de calor necesario para el proceso de secado.
- Se realizó el diseño de un horno con parrilla para la combustión de aserrín derivado de la madera tornillo el cual tiene un flujo de 177 kg/h de aserrín, la combustión se realizó con un exceso de aire de 60 %, obteniéndose un flujo de gases de la combustión de 1 357 kg/h. Las dimensiones del horno son de 1,0 m, 1,0m y 0,8 m, la cual contiene una parrilla para la combustión de aserrín, el cual recibe aire de la combustión a baja presión por la parte inferior de la parrilla.
- El horno tiene una eficiencia del 31 %. Los gases calientes de la combustión se diluyen desde una temperatura de 800 °C hasta una temperatura de 180 °C con 5,258 kg/h de aire inicialmente a 20 °C calentándose hasta 180 °C. En esta etapa los gases calientes ceden su calor sensible al aire desde 400 °C hasta un valor de 180 °C, este proceso se realiza en el ducto de transporte de aire caliente con gases de la combustión desde el horno de combustión hasta la cámara de secado.
- El proceso de secado de madera con aire caliente diluido en gases de la combustión derivados de la quema de aserrín se realiza en un periodo de tiempo de 26,25 horas para las mismas condiciones requeridas de calor para liberar 4,480 kg de agua evaporada desde 26 880 kg/h de madera desde una humedad de 25 % a 10 %.
- Se realizó un benchmarking energético entre los indicadores de desempeño energético en donde se concluye que el Indicador de desempeño energético técnico 2 para el caso de la combustión del petróleo BD5 requiere inyectar 726 642,6 kcal/Tonelada de agua evaporada generada, mientras que la combustión del aserrín requiere 4'980 300 kcal/Tonelada de agua evaporada. En referencia los indicadores de desempeño

energético económico totales, la generación de aire caliente derivada de la combustión del petróleo BD5 tiene un valor de 240,99 Soles facturados /Tonelada de agua evaporada generada a diferencia indicador de desempeño energético económico derivado de la combustión de aserrín el cual tiene un valor de 109,32 Soles facturados /Tonelada de agua evaporada generada.

- Se concluye que la hipótesis planteada inicialmente ha sido refutada para el caso del indicador de desempeño energético técnico 2 y en indicador de desempeño energético ambiental ya que para el caso del aserrín ha sido superior con respecto a la combustión de petróleo BD5; Mientras que para el caso del indicador de desempeño energético económico tal se ha conseguido una mejora del 54 %.

RECOMENDACIONES

Con referencia a la combustión del aserrín se toma en cuenta consideraciones técnicas y antecedentes en el diseño del horno, pero aún queda como trabajo pendiente la mejora u optimización de la combustión, para lo cual sería recomendable realizar simulaciones numéricas variando el número de incisiones sobre la parrilla de combustión y reubicar adecuadamente los puntos de suministro de aire de la combustión. Se indica que se realizó con un exceso de aire del 60 %, lo cual podría verificarse si a valores de 40 % u 80 % se tiene una mejor liberación de flujo de calor.

El proceso de alimentación del aserrín se realizó a través de un transportador helicoidal a una velocidad de 10 rpm, del mismo modo el retiro de las cenizas se realizó de forma manual. Un trabajo pendiente estaría relacionado a la automatización del sistema de alimentación y extracción de las cenizas, para no estar abriendo continuamente las paredes del horno.

Se sugiere a futuro combustionar con aserrín proveniente de otro tipo de maderas como el roble o la catahua, que en sí tienen un valor inferior de su poder calorífico con respecto al tornillo, pero sería adecuado realizar un estudio acerca de la combustión de las maderas mencionadas con la finalidad de caracterizar su comportamiento y liberación de energía calorífica.

Está pendiente la instalación de compartimientos en la cámara de secado con deflectores que permitan al aire caliente un mejor recorrido a través de la carga a secar, pero esto involucra la instalación de un extractor de aire para evitar el confinamiento del aire dentro de la cámara de secado y su posterior enfriamiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Tesis.

Aguilar. (2014). Rediseño e Implementación de un Horno de Secado de Madera con capacidad de 45 m³ perteneciente a la Fabrica PRIMARA S.R.Ltda. Tesis para optar el título de Ingeniero mecánico en la Universidad de las Fuerzas Armadas de Ecuador.

Arbeláez y Feria. (2003) Diseño y construcción de una cámara para el secado de la madera. Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico en la Universidad Tecnológica de Bolívar. Venezuela.

Bonilla. (2015). Horno solar para secado de madera. Informe de práctica de especialidad para optar por el título de ingeniero en mantenimiento industrial, grado licenciatura. Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Carbajal. (2013). Diagnóstico energético en la empresa pesquera Cantabria s.a. para la mejora de sus indicadores energéticos. Tesis para optar el título de Ingeniero en Energía. Universidad Nacional del Santa. Perú.

Castillo. (2015). Diseño de un secador para madera utilizada en la fabricación de palets para la exportación a estados unidos y a la comunidad europea aplicando la norma ispm-15. Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico. Escuela Politécnica del litoral de Ecuador.

Celleri. (2008). Diseño y construcción de un generador de aire caliente con palma africana. Universidad San Francisco de Quito. Ecuador.

Contreras. (2017) Análisis del uso de un secador solar para madera en la ciudad de Cuenca. Tesis de Maestría para optar el grado en Planificación y gestión energética. Universidad de Cuenca. Ecuador.

- Coyago y Criollo. (2013). Diseño térmico de un horno para secado de madera con una capacidad de 23 m³ al mes. Tesis para optar el título de Ingeniero mecánico en la Escuela Politécnica de Quito. Ecuador.
- Cruz y Luna. (2003). Diseño y construcción de un secador para madera con energía solar. Tesis para optar el título de Ingeniero de ejecución en maderas o en la Universidad Tecnológica Equinoccial de Guayaquil. Ecuador.
- Doerner. (2009). Proyecto de cámara de secado para madera elaborada. Tesis para optar el título de Ingeniero mecánico en la Universidad Austral de Chile. Chile.
- Espinoza. (2011). Aplicación de un proceso de secado asistido infrarrojo para la deshidratación del fruto de murtilla. Tesis para optar el título de Ingeniero Alimentario en la Universidad de Chile.
- Hernández. (2017). 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. Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico en la Universidad Técnica de Ambato. Ecuador.
- Hidalgo. (2013). Diseño de una cámara de secado de madera para fábrica de muebles Hidalgo. Tesis para optar el título de Ingeniero Químico en la Escuela Superior Tecnológica de Chimborazo. Riobamba. Ecuador.
- Martínez. (2013). Sistema de automatizado y control del secado de madera para el mercado nacional. Tesis para optar el título de Ingeniero Electrónico en la Universidad Particular Ricardo Palma. Perú.
- Moreno. (2017). Evaluación del efecto de la temperatura de secado en las hojas del Pachataya Pampa Taya. Tesis para optar el título de Ingeniero Agroindustrial en la Universidad José María Arguedas de Apurímac en Perú.

Pastor y Limache (2015). Utilización del aserrín como combustible de cocinas mejoradas en Pucallpa-Perú. Tesis para optar el título de Ingeniero Forestal en la Universidad Nacional de Ucayali. Perú.

Pinchi. (2016). Evaluación del comportamiento del secado artificial de madera corta de la especie cumala (*Virola sp.*), en cámaras de aire caliente en la Industria Inversiones La Oroza S.R.L. Loreto – Perú. Tesis para optar el título de Ingeniero Forestal. Universidad Nacional de la Amazonia. Perú.

Quezada. (2020). Arreglo del suministro de energía para optimizar la línea base energética en Empresa Isadora S.A.C. Tesis para optar el título de Ingeniero en Energía. Universidad Nacional del Santa. Perú.

Sedano. (2006). Diseño de un horno tipo Batch para secado de madera. Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico en la Universidad nacional de Ingeniería. Perú. 2006.

Vallejos. (2003). Comportamiento del pino radiata frente al secado convencional y bajo vacío: Estudio de la cinética y la calidad del secado. Informe de tesis para título de Ingeniero de ejecución de maderas en la Universidad de Bio Bio en Chile.

Textos.

Aranda, Barrio y García León. (2014). Sistemas de gestión de la energía ISO 50001. Universidad de Zaragoza. España. 144 p. ISBN 9788416272419

Arostegui. (1998). Estudio Integral de la Madera para la Construcción. Lima – Perú. Ministerio de Agricultura – Universidad Nacional Agraria.

Burghardt, D. (1984) Ingeniería Termodinámica. México. Ediciones Harla. 2° edición. 575 p. ISBN 9789686034370

Cengel. (2007). Transferencia de Calor y masa. Editorial Mc Graw Hill. 191p. ISBN 970106173X

Comunidad Económica Europea. (1999). Manual del Grupo Andino para el secado de madera". Editorial de la Junta del Acuerdo de Cartagena. 1999. ISBN 84-892727-73-4

Guevara. (2019). Manual de Auditorías Energéticas. Universidad Nacional del Santa. Perú. 85 p.

Incropera. (2006). Fundamentos de Transferencia de Calor. Editorial Pearsons Educación. ISBN 970170170.

Martínez. (2006). Tecnología de la Madera. Editorial Mundi Prensa Libros. España. ISBN 9788484762638

Mapuey y Andrés. (2016). Introducción al secado con aire caliente. Editorial de la universidad de Valencia. España. ISBN 9788497050258

Vizcarra. (1998). Guía para el Secado de la Madera en Hornos", Contrato USAID: 511-0621-C-00-3027, Chemonics Internacional, USAID/Bolivia, agosto 98.

Linkografía.

Cabrera A. (2013). Proceso de Secado. Universidad de las Américas. Puebla. México. [Consulta: 25 de febrero del 2021]. Disponible en:
http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/cabrera_v_a/

Calleri (2008). Diseño y construcción de un generador de aire caliente. Ecuador. [Consulta: 15 de abril del 2021]. Disponible en:
<http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/867>

Campos. (2018). Línea base, Indicadores de desempeño Energético. Soluciones y eficiencia energética. Chile. [Consulta: 08 de marzo del 2021]. Disponible en:
<http://guiaiso50001.cl/guia/wp-content/uploads/2017/05/linea-base-indicadores-de-desempeno-P-3-AP-1.pdf>

Castillo. (2011). Manual de Combustión. Perú. [Consulta: 13 de febrero del 2021]. Disponible en:

http://www.combustionindustrial.com/MANUAL_PRACTICO_DE_COMBUSTION_INDUSTRIAL.pdf

Cite Madera. (2016). Técnicas de Secado de la Madera. Centro de Innovación Tecnológico de la Madera (CITE madera). Ministerio de la Producción. Perú. [Consulta: 11 de febrero del 2021]. Disponible en:

https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/571600/03._T%C3%A9cnicas_de_secado.pdf

Empresa Xinzhou. (2019). Túnel de secado, SECO-10-3. Empresa Xinzhou. [Consulta: 17 de marzo del 2021]. Disponible en:

<http://indusdryovens.com/6-5-2-seco-10-3-tunnel-oven.html>

Facultad de Ingeniería. (2017). Capítulo de Ventiladores. Texto de Universidad de Buenos Aires. [Consulta: 11 de marzo del 2021]. Disponible en:

http://www.fi.uba.ar/archivos/posgrados_apuntes_CAPITULO_VENTILADORES.pdf

FAO. (2015). Evaluación de los recursos forestales mundiales 2015. Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura. Italia. [Consulta: 17 de marzo del 2021]. Disponible en:

<http://www.fao.org/3/i4793s/i4793s.pdf>

FAO. (2018). La industria de la madera en el Perú. Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura. Perú. [Consulta: 22 de marzo del 2021]. Disponible en:

<http://www.fao.org/3/I8335ES/i8335es.pdf>

Flores. (2013). Informe: Secado Artificial de madera. Universidad Agraria de la Molina. Perú. [Consulta: 8 de marzo del 2021]. Disponible en:

[http://cedinfor.lamolina.edu.pe/Articulos_RFP/Vol04_no1-2_Ene-Dic70_\(07\)/vol4_art8.pdf](http://cedinfor.lamolina.edu.pe/Articulos_RFP/Vol04_no1-2_Ene-Dic70_(07)/vol4_art8.pdf)

Manual Martin (2014). Componentes y Accesorios para Manejo de Materiales. Transportadores helicoidales. Página web de Martin Ingeniería. [Consulta: 22 de marzo del 2021]. Disponible en:

<http://sopetra.com.br/view/catalogo/transportadores-helicoidais-completos-catalogo.pdf>

Osinergmin. (2021). Tarifas Eléctricas. Zona de Concesión Chimbote. Sector Típico 2. OSINERGMIN. [Consulta: 8 de mayo del 2021]. Disponible en:

<https://www.osinergmin.gob.pe/Tarifas/Electricidad/PliegoTarifario.aspx?Id=20000>

Pastor y Aparicio. (2015). Utilización del aserrín como combustible de cocinas mejoradas en Pucallpa – Perú. Artículo Científico. Universidad Nacional de Ucayali. Perú. [Consulta: 10 de febrero del 2021]. Disponible en:

http://repositorio.unu.edu.pe/bitstream/handle/UNU/4172/UNU_FORESTAL_AC_2015_GUILLERMO-PASTOR_APARICIO-LIMACHE.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Poblete. (1999). Inclusión del aserrín en tableros de partículas. Informe de Investigación. Revista Bosque Volumen 3. Chile. Consulta: 10 de febrero del 2021]. Disponible en:

<http://revistas.uach.cl/pdf/bosque/v3n1/art05.pdf>

Pérez. (2008). Secado Artificial de Madera. España. [Consulta: 10 de febrero del 2021]. Disponible en:

<http://jrperez.webs.uvigo.es/servicios-madera-secado.htm>

POWDER TRONIC. (2016). Horno de secado para madera. Equipo de Marketing de Powder Tronic. España. [Consulta: 8 de abril del 2021]. Disponible en:

<https://powdertronic.com/horno-de-secado-para-madera/>

Requena. (2014). Determinación del volumen de un tronco de pirámide. Página Web universo de fórmulas. [Consulta: 20 de febrero del 2021]. Disponible en: <https://www.universoformulas.com/matematicas/geometria/volumen-tronco-piramide/>

Sandoval, S. (2009). Modelación matemática del secado convencional de madera. Publicación Científica realizada en la Revista Scielo 2009. México. [Consulta: 1 de abril del 2021]. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712009000100006

SECAMAD. (2020). Instalaciones técnicas de secado. Secaderos para madera: instalaciones completas de pequeña y mediana capacidad. SECAMAD. México. [Consulta: 8 de mayo de 2021]. Disponible en: <https://www.interempresas.net/Madera/FeriaVirtual/Producto-Secaderos-para-madera-19612.html>

Serret, Nurian; Giralt, Giselle & Quintero, Mairet. (2016). Caracterización de aserrín de diferentes maderas Tecnología Química, vol. XXXVI, núm. 3, 2016, pp. 468-479 Universidad de Oriente Santiago de Cuba, Cuba. [Consulta: 11 de febrero del 2021]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/4455/445546669012.pdf>

Uceda. (2015). Determinación del Poder Calórico de 20 especies forestales de la amazonia Peruana. Revista Forestal Peruana. [Consulta: 20 de febrero del 2021]. Disponible en:

Vavliova. (2021). Conversión de unidades de volumen, presión y densidad online. [Consulta: 11 de abril del 2021]. Disponible en: <https://www.convert-me.com/es/convert/volume/?u=m3&v=30.4>

WTM Vaglio. (2018). Secadores para aserrado de vacío en Francia. Empresa WTM Vaglio. Francia. [Consulta: 8 de febrero del 2021]. Disponible en:
<https://www.wtmvaglio.com/es/secador-de-vacio-ventilado-para-mesas-en-francfort/>

ANEXO

Anexo 1: Poder calorífico medio de 20 especies forestales del Perú

Anexo 2: Arrastre de vapor y desplazamiento del agua en el proceso de secado

Anexo 3: Patio de Secado Natural de la Madera desde 50 a 25 a 20 %

Anexo 4: Métodos de apilado para el secado de la madera

Anexo 5: Tablas para dimensionado de transportador helicoidal

Anexo 6: Costos de la Energía Eléctrica Sector Típico Tarifa BT5 NR Chimbote

Anexo 7: Factores de emisiones

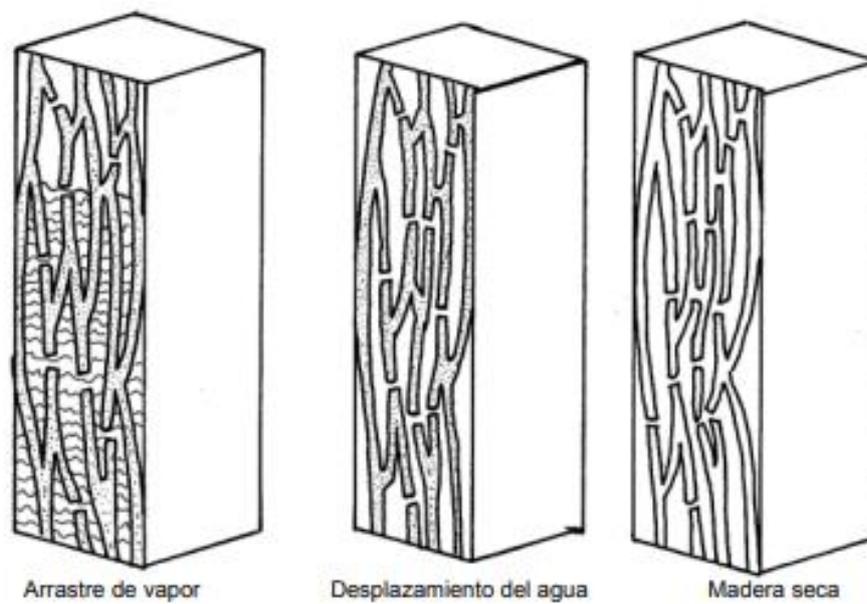
Anexo 8: Layout de planta

Anexo 1: Poder calorífico medio de 20 especies forestales del Perú

Muestra No.	Especies	p. c. s. cal/g.
1	Apacharama	4670
2	Azufre caspi	4770
3	Bellaco caspi	4700
4	Carahuasca	4780
5	Caupuri	4768
6	Copal	4721
7	Cumala blanca	4735
8	Chimicua	4810
9	Huamansamana	4730
10	Isma moena	4798
11	Jarabe huayo	4677
12	Machimango colorado	4745
13	Marupá	4883
14	Quillo sisa	4690
15	Requia blanca	4885
16	Sacha caoba	4763
17	Sacha uvilla	4754
18	Shiari	4719
19	Shiringa masha	4621
20	Tornilflo	4798

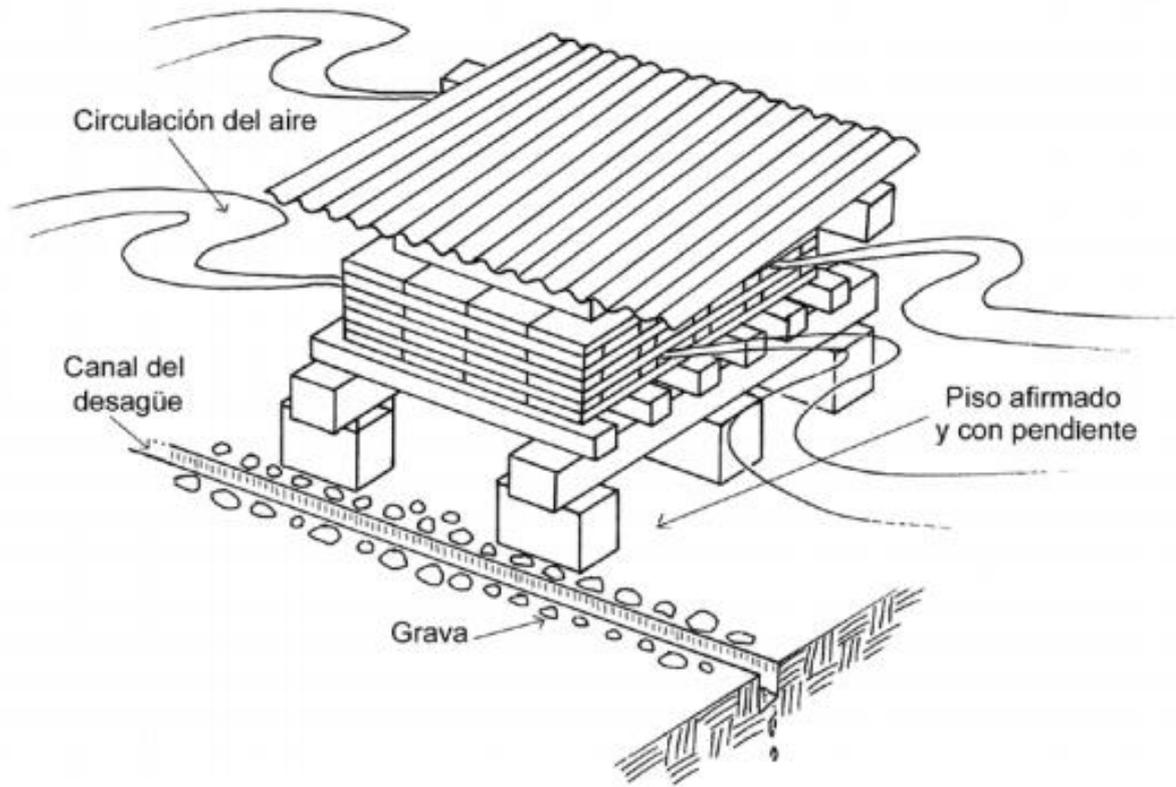
Fuente : Determinación del Poder Calorífico de 20 especies forestales de la amazonia Peruana.
Revista Forestal Peruana. 2015.

Anexo 2: Arrastre de vapor y desplazamiento del agua en el proceso de secado



Fuente: Técnicas de secado. CITE Madera

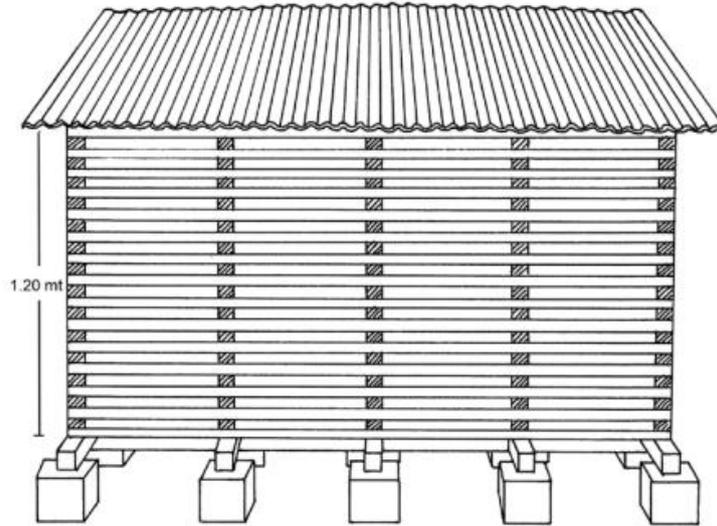
Anexo 3: Patio de Secado Natural de la Madera desde 50 a 25 a 20 %



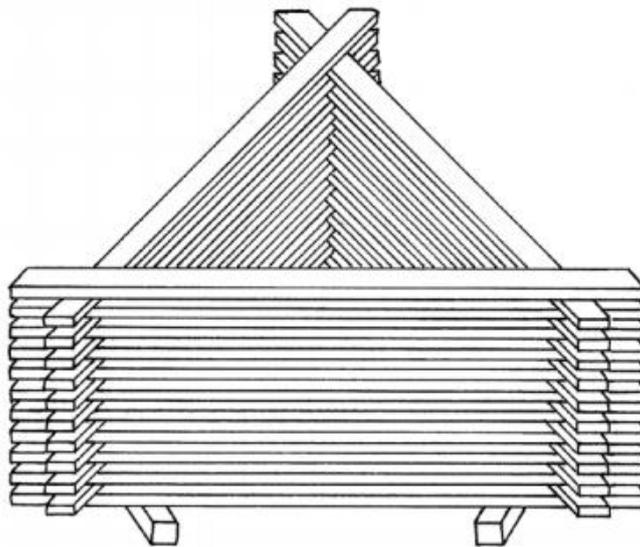
Fuente: Técnicas de secado. CITE Madera

Anexo 4: Métodos de apilado para el secado de la madera

Dibujo N° 21 . Apilado horizontal de la madera



Dibujo N° 22 . Apilado de la madera en triángulo



Fuente: Técnicas de secado. CITE Madera

Anexo 5: Tablas para dimensionado de transportador helicoidal

Tabla 1-2
Características de los Materiales



Material	Peso lb por pie cúbico	Código de Material	Selección de Rodamiento Intermedio	Serie de Componentes	Factor de Material F_m	Carga de Artesa
Arsénico Pulverizado	30	A100-25R	H	2	0.8	45
Arsenita de Plomo	72	A40-35R	L-S-B	1	1.4	30A
Asbesto desfibrado	20-40	E-46XY	H	2	1	30B
Aserrín, Seco	10-13	B6-45UX	L-S-B	1	1.4	15
Asfalto (de Utah)	37	C1/2-35	H	3	1.5	30A
Asfalto, Triturado - 1/2"	45	C1/2-45	H	2	2	30A
Avena	26	C1/2-25MN	L-S-B	1	0.4	45
Avena, cáscarilla	8-12	B6-35NY	L-S-B	1	0.5	30A
Avena, harina	35	A100-35	L-S-B	1	0.5	30A
Avena, procesada	19-24	C1/2-35NY	L-S-B	1	0.6	30A
Avena, rizada	19-26	C1/2-35	L-S-B	1	0.5	30A
Avena, triturada	22	B6-45NY	L-S-B	1	0.6	30A
Azafrán (ver Cártamo)	-	-	-	-	-	-
Azúcar de leche	32	A100-35PX	S	1	0.6	30A
Azúcar de Ramolacha, Pulpa Húmeda	25-45	C1/2-35X	L-S-B	1	1.2	30A
Azúcar de Remolacha, Pulpa Seca	12-15	C1/2-26	H	2	0.9	30B
Azúcar, cruda, mascabado	55-65	B6-35PX	S	1	1.5	30A
Azúcar, en polvo	50-60	A100-35PX	S	1	0.8	30A
Azúcar, refinada, granulada húmeda	55-65	C1/2-35X	S	1	1.4-2.0	30A
Azúcar, refinada, granulada seca	50-55	B6-35PU	S	1	1.0-1.2	30A
Azúcar, en polvo	50-60	A100-35MN	L-S-B	1	0.6	30A

Tabla 1-14
Factor, F_f

Tipo de Helicoidal	F_f Factor por porcentaje de carga de transportador			
	15%	30%	45%	95%
Estándar	1.0	1.0	1.0	1.0
Helicoidal con Corte	1.10	1.15	1.20	1.3
Con Corte y Doblez	N.R.*	1.50	1.70	2.20
Helicoidal de Listón	1.05	1.14	1.20	—
*No recomendada				

Tabla 1-16

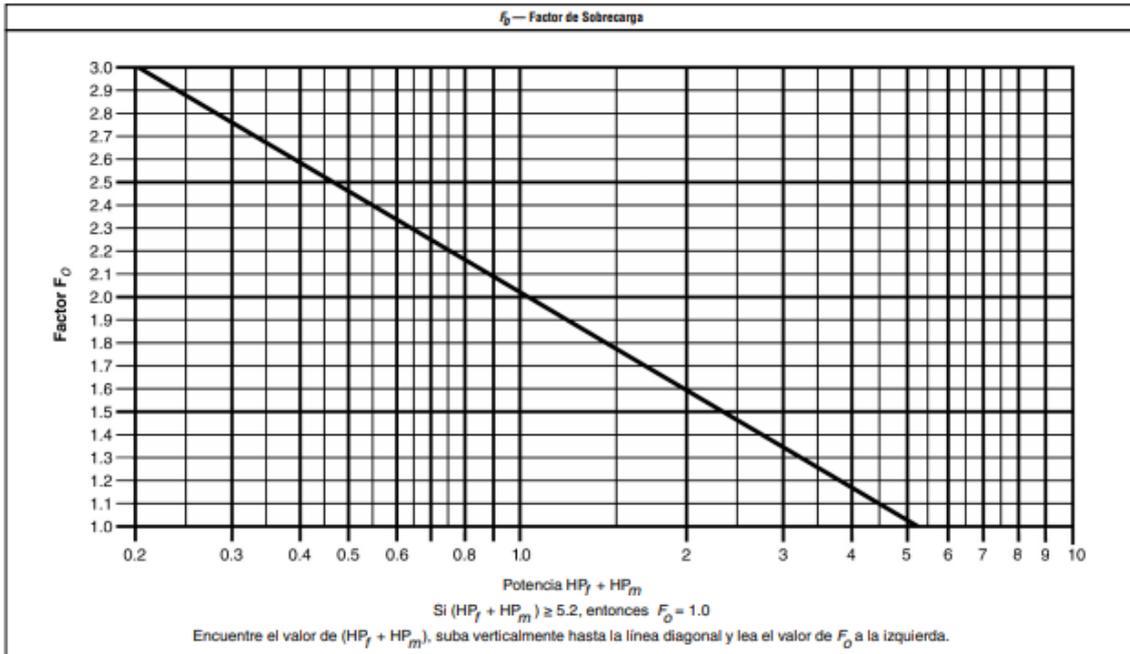


Tabla 1-17

Factor de Eficiencia (e) de las Transmisiones				
Transmisión para Transportador Helicoidal o Montado en Eje con Transmisión de Bandas en "V"	Reductor de Engranajes Helicoidales con Transmisión de Bandas en V y Cople	Motorreductor con Cople	Motorreductor con Transmisión de Cadena	Corona Sinfin
.88	.87	.95	.87	Consulte a

1104

Fuente: Manual Martin para diseño de transportadores helicoidales de baja potencia

Anexo 6: Costos de la Energía Eléctrica Sector Típico Tarifa BT5 NR Chimbote

	Cargo por Energía Reactiva que exceda el 30% del total de la Energía Activa	ctm. S./kVar.h	4.87
TARIFA BT4:	TARIFA CON SIMPLE MEDICIÓN DE ENERGÍA ACTIVA Y CONTRATACIÓN O MEDICIÓN DE UNA POTENCIA 1E1P		
	Cargo Fijo Mensual	S./mes	10.46
	Cargo por Energía Activa	ctm. S./kW.h	24.45
	Cargo por Potencia Activa de generación para Usuarios:		
	Presentes en Punta	S./kW-mes	47.22
	Presentes Fuera de Punta	S./kW-mes	43.44
	Cargo por Potencia Activa de redes de distribución para Usuarios:		
	Presentes en Punta	S./kW-mes	59.03
	Presentes Fuera de Punta	S./kW-mes	56.83
	Cargo por Energía Reactiva que exceda el 30% del total de la Energía Activa	ctm. S./kVar.h	4.87
TARIFA BT5A:	TARIFA CON DOBLE MEDICIÓN DE ENERGÍA 2E		
	a) Usuarios con demanda máxima mensual de hasta 20kW en HP y HFP		
	Cargo Fijo Mensual	S./mes	10.46
	Cargo por Energía Activa en Punta	ctm. S./kW.h	165.48
	Cargo por Energía Activa Fuera de Punta	ctm. S./kW.h	23.21
	Cargo por Exceso de Potencia en Horas Fuera de Punta	S./kW-mes	56.58
	b) Usuarios con demanda máxima mensual de hasta 20kW en HP y 50kW en HFP		
	Cargo Fijo Mensual	S./mes	10.46
	Cargo por Energía Activa en Punta	ctm. S./kW.h	195.81
	Cargo por Energía Activa Fuera de Punta	ctm. S./kW.h	23.21
	Cargo por Exceso de Potencia en Horas Fuera de Punta	S./kW-mes	56.58
TARIFA BT5B:	TARIFA CON SIMPLE MEDICIÓN DE ENERGÍA 1E		
No Residencial	Cargo Fijo Mensual	S./mes	3.72
	Cargo por Energía Activa	ctm. S./kW.h	67.09
TARIFA BT5B:	TARIFA CON SIMPLE MEDICIÓN DE ENERGÍA 1E		
Residencial	a) Para usuarios con consumos menores o iguales a 100 kW.h por mes		
	0 - 30 kW.h		
	Cargo Fijo Mensual	S./mes	3.57
	Cargo por Energía Activa	ctm. S./kW.h	48.24
	31 - 100 kW.h		
	Cargo Fijo Mensual	S./mes	3.57
	Cargo por Energía Activa - Primeros 30 kW.h	S./mes	14.47
	Cargo por Energía Activa - Exceso de 30 kW.h	ctm. S./kW.h	64.32
	b) Para usuarios con consumos mayores a 100 kW.h por mes		
	Cargo Fijo Mensual	S./mes	3.72
	Cargo por Energía Activa	ctm. S./kW.h	67.09
TARIFA BT5D:	TARIFA CON SIMPLE MEDICIÓN DE ENERGÍA 1E		
No Residencial	Cargo Fijo Mensual	S./mes	3.72
	Cargo por Energía Activa	ctm. S./kW.h	67.09

Fuente: Extraído de la pagina web de OSINERGMIN

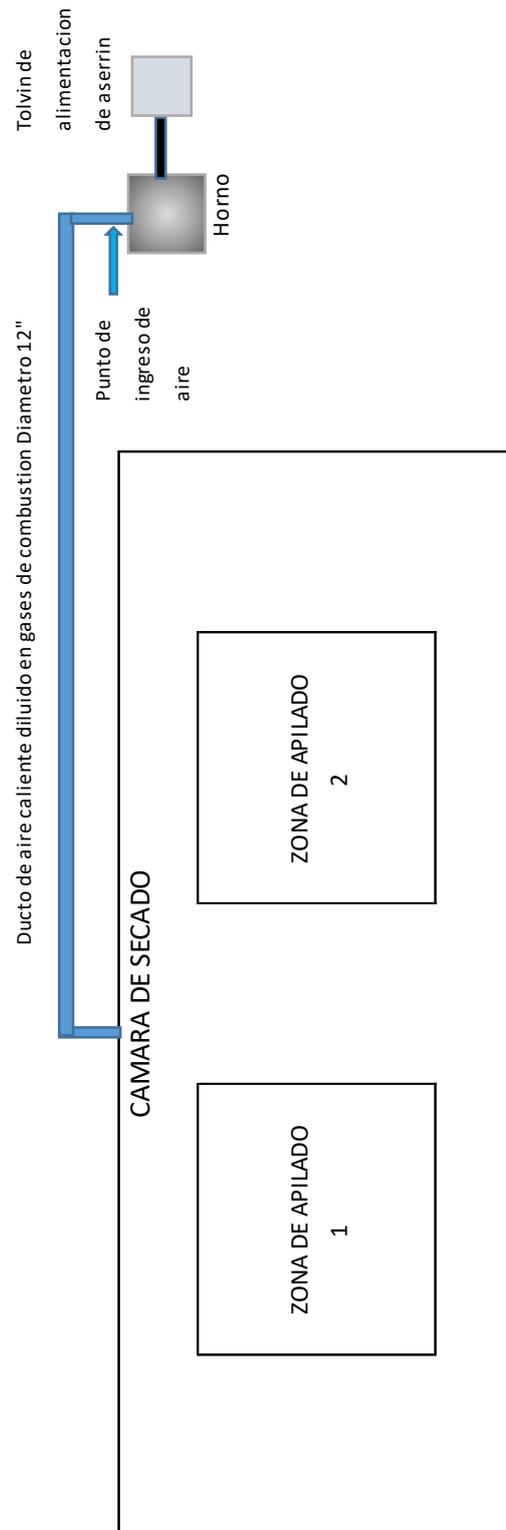
Anexo 7: Factores de emisiones

FACTORES DE EMISIÓN POR DEFECTO PARA LA COMBUSTIÓN ESTACIONARIA EN LAS INDUSTRIAS ENERGÉTICAS (kg de gas de efecto invernadero por Tj sobre una base calórica neta)											
Combustible	CO ₂			CH ₄			N ₂ O				
	FE por defecto (kgCO ₂ /Tj)	Inferior	Superior	FE por defecto (kgCH ₄ /Tj)	Inferior	Superior	FE por defecto (kgN ₂ O/Tj)	Inferior	Superior		
	Petróleo crudo	73,300	71,000	75,500	3,00	1,00	10,00	0,60	0,20	2,00	
Gas Natural Licuado	64,200	58,300	70,400	3,00	1,00	10,00	0,60	0,20	2,00		
Gasolina para motores	69,300	67,500	73,000	3,00	1,00	10,00	0,60	0,20	2,00		
Gasolina para la aviación	70,000	67,500	73,000	3,00	1,00	10,00	0,60	0,20	2,00		
Gasolina para motor a reacción	70,000	67,500	73,000	3,00	1,00	10,00	0,60	0,20	2,00		
Gas/Diesel Oil	74,000,00	72,600,00	###	3,00	1,00	10,00	0,60	0,20	2,00		
Fuelóleo residual	77,400	75,500	78,800	3,00	1,00	10,00	0,60	0,20	2,00		
Gases licuados de petróleo	63,100	61,600	65,600	1,00	0,30	3,00	0,10	0,03	0,30		
Lubricantes	73,300	71,900	75,200	3,00	1,00	10,00	0,60	0,20	2,00		
Gas de refinería	57,600	48,200	69,000	1,00	0,30	3,00	0,10	0,03	0,30		
Ceras de parafina	73,300	72,200	74,400	3,00	1,00	10,00	0,60	0,20	2,00		
Espiritu blanco y SEP	73,300	72,200	74,400	3,00	1,00	10,00	0,60	0,20	2,00		
Otros productos del petróleo	73,300	72,200	74,400	3,00	1,00	10,00	0,60	0,20	2,00		
Antracita	98,300	94,600	101,000	1,00	0,30	3,00	1,50	0,50	5,00		
Carbón de coque	94,600	87,300	101,000	1,00	0,30	3,00	1,50	0,50	5,00		
Gas natural	58,100	54,300	58,300	1,00	0,30	3,00	0,10	0,03	0,30		
Biogásolina	70,800	59,800	84,300	3,00	1,00	10,00	0,60	0,20	2,00		
Biocombustibles líquidos	70,800	59,800	84,300	3,00	1,00	10,00	0,60	0,20	2,00		
Biodiésel	70,800	59,800	84,300	3,00	1,00	10,00	0,60	0,20	2,00		
Otros biocombustibles líquidos	73,600	67,100	85,300	3,00	1,00	10,00	0,60	0,20	2,00		
Otra biomasa sólida primaria	100,000	84,700	117,000	30,00	10,00	100,00	4,00	1,50	15,00		
Biomasa sólida	112,000	95,000	132,000	300,00	100,00	900,00	4,00	1,50	15,00		
Maderal/Desechos de madera	112,000	95,000	132,000	200,00	70,00	600,00	4,00	1,50	15,00		
Carbón vegetal	54,600	46,200	66,000	1,00	0,30	3,00	0,10	0,03	0,30		
Biomasa gaseosa	71,900	70,800	73,700	3,00	1,00	10,00	0,60	0,20	2,00		
Kerosene	71,900	70,800	73,700	3,00	1,00	10,00	0,60	0,20	2,00		

Fuente: Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero - Volumen 2: Energía, pág. 2.16 - 2.17

Fuente: Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero - Volumen 2: Energía, pág. 2.16 - 2.17

Anexo 8: Layout de Planta



Fuente: Elaboración Propia



DECLARACION JURADA DE AUTORÍA

Yo, Pedro Luis Oliva Ascate, estudiante de la

Facultad:	Ciencias		Educación		Ingeniería	X
Escuela Profesional:	Ingeniería en Energía					
Departamento Académico:						
Escuela de Posgrado	Maestría			Doctorado		

Programa:

De la Universidad Nacional del Santa; Declaro que el trabajo de investigación es un **trabajo inédito**, intitulado:

“GENERACION DE AIRE CALIENTE CON ASERRIN Y LA OPTIMIZACION DE LOS INDICADORES DE DESEMPEÑO ENERGETICO DE UN SECADOR PARA MADERA”

presentado en ...132..... folios, para la obtención del Grado académico: ()

Título profesional: (X) Investigación anual: ()

- He citado todas las fuentes empleadas, no he utilizado otra fuente distinta a las declaradas en el presente trabajo.
- Este trabajo de investigación no ha sido presentado con anterioridad ni completa ni parcialmente para la obtención de grado académico o título profesional.
- Comprendo que el trabajo de investigación será público y por lo tanto sujeto a ser revisado electrónicamente para la detección de plagio por el VRIN.
- De encontrarse uso de material intelectual sin el reconocimiento de su fuente o autor, me someto a las sanciones que determinan el proceso disciplinario.

Chimbote, setiembre de 2021

Firma:

Nombres y Apellidos: Pedro Luis Oliva Ascate

DNI:42866131



DECLARACION JURADA DE AUTORÍA

Yo, Edwin Renato Pumarica Peláez, estudiante de la

Facultad:	Ciencias		Educación		Ingeniería	X
Escuela Profesional:	Ingeniería en Energía					
Departamento Académico:						
Escuela de Posgrado	Maestría			Doctorado		

Programa:

De la Universidad Nacional del Santa; Declaro que el trabajo de investigación es un **trabajo inédito**, intitulado:

“GENERACION DE AIRE CALIENTE CON ASERRIN Y LA OPTIMIZACION DE LOS INDICADORES DE DESEMPEÑO ENERGETICO DE UN SECADOR PARA MADERA”

presentado en ...132..... folios, para la obtención del Grado académico: ()

Título profesional: (X) Investigación anual: ()

- He citado todas las fuentes empleadas, no he utilizado otra fuente distinta a las declaradas en el presente trabajo.
- Este trabajo de investigación no ha sido presentado con anterioridad ni completa ni parcialmente para la obtención de grado académico o título profesional.
- Comprendo que el trabajo de investigación será público y por lo tanto sujeto a ser revisado electrónicamente para la detección de plagio por el VRIN.
- De encontrarse uso de material intelectual sin el reconocimiento de su fuente o autor, me someto a las sanciones que determinan el proceso disciplinario.

Chimbote, setiembre de 2021

Firma:

Nombres y Apellidos: Edwin Renato Pumarica Peláez

DNI:33261801

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería en Energía

Informe del Asesor Informe de Tesis para obtener el título profesional

- 1) Apellidos/Nombres: ___Pedro Luis Oliva Ascate
Edwin Renato Pumarica Peláez
- 2) Título de la Tesis: “GENERACION DE AIRE CALIENTE CON ASERRIN Y LA OPTIMIZACION DE LOS INDICADORES DE DESEMPEÑO ENERGETICO DE UN SECADOR PARA MADERA”
- 3) Evaluación del Contenido: La presente tesis para título reúne las condiciones metodológicas de la investigación científica y está en conformidad con los Artículos N° 39 y 40 del Reglamento General de Grados y Títulos vigente de la Universidad Nacional del Santa, concluyéndose que los tesisistas hna elaborado el presente informe dentro de las líneas de investigación que promueve la E.P.I.E_____
- 4) Observaciones_____Ninguna_____
- 5) Certificación de Aprobación: En calidad de asesor certifico la aprobación de la tesis para título.

Fecha: Nuevo Chimbote, setiembre del 2021.



Mg. Robert Fabian Guevara Chinchayán
Asesor

INFORME DE ORIGINALIDAD

24%

ÍNDICE DE SIMILITUD

24%

FUENTES DE INTERNET

0%

PUBLICACIONES

5%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	docplayer.es Fuente de Internet	6%
2	repositorio.usfq.edu.ec Fuente de Internet	4%
3	1library.co Fuente de Internet	3%
4	repositorio.uns.edu.pe Fuente de Internet	2%
5	dspace.ucuenca.edu.ec Fuente de Internet	2%
6	scielo.sld.cu Fuente de Internet	1%
7	dspace.esPOCH.edu.ec Fuente de Internet	1%
8	repositorio.unajma.edu.pe Fuente de Internet	1%
9	Submitted to Universidad Nacional del Santa Trabajo del estudiante	1%

10	cedinfor.lamolina.edu.pe Fuente de Internet	1 %
11	cybertesis.urp.edu.pe Fuente de Internet	1 %
12	cybertesis.uach.cl Fuente de Internet	1 %
13	www.dspace.espol.edu.ec Fuente de Internet	1 %
14	repositorio.unas.edu.pe Fuente de Internet	1 %

Excluir citas Apagado Excluir coincidencias < 1%
 Excluir bibliografía Apagado