

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

“DISEÑO Y SIMULACION DEL FUNCIONAMIENTO DE UN SECADOR DE FLUJO FORZADO PARA MADERA PERMEABLE CON CAPACIDAD DE 43m³/MES, UTILIZANDO UN QUEMADOR CON BIOMASA”

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

YENNYFER CAROLINA CHAPALBAY AGUILAR

PABLO GIOVANNY REINOSO QUIROZ

DIRECTOR: ERNESTO SORIA

CODIRECTOR: ANGELO VILLAVICENCIO

SANGOLQUI, 19 DE OCTUBRE DEL 2011

RESUMEN

La presente tesis consiste en el diseño y simulación del funcionamiento de un secador de flujo forzado para madera. La aplicación de nuevas tecnologías relacionadas con el aprovechamiento de los desechos de la industria de la madera mediante su combustión, abastecen de energía limpia tanto a grandes, medianos y pequeños consumidores.

El objetivo central es Diseñar y Simular el funcionamiento del secador artificial de madera, mediante un quemador con biomasa, y más específicamente el sistema de calefacción y su respectivo intercambiador de calor.

Para lograr lo anteriormente descrito, se recopiló información del proceso de secado de madera, las variables a tomar en cuenta para mantener y alcanzar estabilidad dimensional debido a la humedad.

La tesis consta de siete capítulos en los que se estudiaron distintos tópicos según la importancia que reportaran al estudio.

El capítulo dos describe en su totalidad las características, el comportamiento, y el proceso de secado de la madera.

El capítulo tres hace una descripción de las propiedades de los residuos de madera y sus diferentes reacciones frente a la combustión.

El capítulo cuatro se refiere al diseño de la cámara de secado, cámara de combustión, y sus diferentes sistemas.

El capítulo cinco describe el proceso de secado de madera mediante un software adecuado, y los aspectos a tomar en cuenta para su funcionamiento con mantenimientos necesarios para una vida útil duradera.

En el capítulo seis se realiza el análisis económico y financiero de la tesis en estudio.

En el capítulo siete concluimos de acuerdo a los objetivos inicialmente planteados y recomendamos aspectos a tomar en cuenta para un óptimo funcionamiento del proyecto.

ABSTRACT

This thesis is the design and simulation of the operation of a flow forced wood dryer. The application of new technologies related to the utilization of the waste of the industry of wood by its combustion, supply of clean energy small, medium and large consumers.

The main objective is to design and simulate the operation of the artificial hair-wood by a burner with biomass and more specifically the heating system and its respective heat exchanger.

Towards described above, collect information from the process of drying of wood, the variables to take into account to maintain and achieve dimensional stability due to the humidity.

The thesis consists of seven chapters which studied various topics according to the importance that measured in the study.

Chapter two describes the characteristics, behavior, and drying of the wood.

Chapter three is a description of the properties of wood residues and their different reactions to the burning.

Chapter four refers to the design of the camera of drying, combustion chamber, and their different systems.

Chapter five describes the process of drying of wood using suitable software and aspects to take into account for its operation with necessary maintenance for a long useful life.

In chapter six is the economic and financial analysis of the thesis study.

In chapter seven we concluded according to the objectives initially set and recommend aspects to take into account for the optimal functioning of the project.

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto de grado titulado “DISEÑO Y SIMULACION DEL FUNCIONAMIENTO DE UN SECADOR DE FLUJO FORZADO PARA MADERA PERMEABLE CON CAPACIDAD DE 43m³/MES, UTILIZANDO UN QUEMADOR CON BIOMASA” fue realizado en su totalidad por la Srta. YENNYFER CAROLINA CHAPALBAY AGUILAR y el Sr. PABLO GIOVANNY REINOSO QUIROZ como requerimiento previo para la obtención del Título de Ingeniero Mecánico.

ING. ERNESTO SORIA
DIRECTOR

ING. ANGELO VILLAVICENCIO
CODIRECTOR

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, YENNYFER CAROLINA CHAPALBAY AGUILAR
y PABLO GIOVANNY REINOSO QUIROZ

DECLARAMOS QUE:

La tesis / proyecto de grado titulado “ DISEÑO Y SIMULACION DEL FUNCIONAMIENTO DE UN SECADOR DE FLUJO FORZADO PARA MADERA PERMEABLE CON CAPACIDAD DE 43m³/MES, UTILIZANDO UN QUEMADOR CON BIOMASA ”, ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico de la tesis/proyecto de grado en mención.

Sangolquí, 20 de Agosto del 2011

YENNYFER CAROLINA
CHAPALBAY AGUILAR

C.C. 171847279-6

PABLO GIOVANNY
REINOSO QUIROZ

C.C.1716783293

AUTORIZACIÓN

Nosotros, YENNYFER CAROLINA CHAPALBAY AGUILAR
y PABLO GIOVANNY REINOSO QUIROZ

Autorizo a la Escuela Politécnica del Ejército la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución del trabajo “DISEÑO Y SIMULACION DEL FUNCIONAMIENTO DE UN SECADOR DE FLUJO FORZADO PARA MADERA PERMEABLE CON CAPACIDAD DE 43m³/MES, UTILIZANDO UN QUEMADOR CON BIOMASA ” , cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, 20 de Agosto del 2011

YENNYFER CAROLINA
CHAPALBAY AGUILAR

PABLO GIOVANNY
REINOSO QUIROZ

DEDICATORIA

Este nuevo triunfo lo dedico a mis Padres Juan y Amparo, quienes a pesar de las adversidades que han tenido, y con la nobleza en su corazón me han ayudado a seguir por el camino correcto, lleno de humildad y principios.

A mis hermanos Andrés, Santiago, Juanito, David, Harold, con sus bendiciones y confianza pude darles esta satisfacción tan anhelada y emocionante para todos. Familia querida Dios nos Bendiga hoy y siempre como lo ha hecho hasta ahora.

Yennyfer Chapalbay

A mis queridos padres Anita y Edgar pilares en mi vida, quienes me orientaron y guiaron durante todo este largo proceso.

A mi madre, quien con su infinito amor hacia sus hijos siempre estuvo en los momentos de alegría y tristeza en el transcurso de mi vida universitaria.

A mi padre, que con su apoyo incondicional siempre está pendiente, porque me indicaste siempre el camino correcto a seguir.

Queridos padres, nunca los defraude, los frutos de sus esfuerzos no han sido en vano por eso les dedico una nueva alegría más a sus vidas.

Pablo Reinoso

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por ser la luz de mi camino y guía en todo momento, a mis Padres Juan y Amparo, por darme la vida y ser un pilar fundamental durante mi carrera estudiantil, a mis hermanos, por brindarme protección y amor, a toda mi familia por todos sus consejos que me han llevado a ser lo que soy, a todas las personas que en algún momento de mi vida me dieron apoyo para seguir adelante, a Uds. Sres. Director y Codirector por apoyarme con sus sabios conocimientos durante el desarrollo de la Tesis, y a quienes han hecho posible este logro tan significativo para mí.

Yennyfer Chapalbay

Le doy infinitamente gracias a Dios, por haberme dado fuerza y salud para terminar esta etapa de estudios.

Agradezco también la confianza y el apoyo de mis padres, hermano, novia y todas las personas que estuvieron involucradas en el desarrollo de mi proyecto, porque han contribuido positivamente a la finalización de este proyecto de tesis.

A los ingenieros que influenciaron en mí, durante toda mi carrera estudiantil y en especial a mis directores, porque cada uno, con sus valiosas aportaciones, me ayudó a crecer como persona y como profesional.

Gracias a todos.

Pablo Reinoso

INDICE DE CONTENIDOS

CAPITULO I

INTRODUCCION

1.1. ANTECEDENTES.....	1
1.2. POLITICA AMBIENTAL	7
1.3. OBJETIVOS.....	7
1.4. ALCANCE DEL PROYECTO	7
1.5. JUSTIFICACIÓN.....	8

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. CONCEPTOS BÁSICOS DE LA MADERA	9
2.2. PARÁMETROS FUNDAMENTALES EN EL SECADO DE LA MADERA	17
2.3. DESARROLLO DEL PROCESO DE SECADO	30
2.4. DEFECTOS DE SECADO	83
2.5. SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS.....	94

CAPITULO III

COMBUSTION DE LOS RESIDUOS DE MADERA

3.1. DEFINICIÓN	99
3.2. PODER CALORÍFICO DE LOS RESIDUOS DE MADERA	99
3.3. COMBUSTIÓN.....	100
3.4. REACCIONES DE COMBUSTIÓN	101
3.5. RELACIÓN AIRE – COMBUSTIBLE	107
3.6. PROPIEDADES DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN	111

CAPITULO IV

DISEÑO

4.1. PARAMETROS DE DISEÑO	119
4.2. CAMARA DE SECADO Y DE COMBUSTION.....	123
4.3. SISTEMA DE VENTILACION.....	124
4.4. SISTEMA DE CALEFACCION	128
4.5. SISTEMA DE HUMECTACION.....	176

4.6. SISTEMA DE CONTROL	176
4.7. ELABORACION DE PLANOS PARA LA CONSTRUCCION	178
CAPÍTULO V	
DIAGRAMA DE PROCESOS Y SIMULACION	
5.1 DIAGRAMAS DE PROCESO	179
5.2. DIAGRAMAS DE CONSTRUCCION	181
5.3. DIAGRAMAS DE MONTAJE	191
5.4. SIMULACION DEL FUNCIONAMIENTO DEL SECADOR	192
CAPITULO VI	
ANALISIS ECONOMICO Y FINANCIERO	
6.1. ANALISIS ECONOMICO.....	215
6.2. ANALISIS FINANCIERO	224
CAPITULO VII	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
7.1. CONCLUSIONES	226
7.2. RECOMENDACIONES	227
BIBLIOGRAFIA	229
ANEXOS	232

LISTADO DE TABLAS

CAPITULO II

Tabla 2.1	Psicométrica a Nivel del Mar	20
Tabla 2.2	Humedad relativa y contenido de humedad para diferentes temperaturas de bulbo seco y depresiones de bulbo húmedo	25
Tabla 2.3	Tabla Psicométrica a 100% de Humedad Relativa	43
Tabla 2.4	Características técnicas de la pistola medidora de temperatura	51
Tabla 2.5	Características técnicas del dispositivo de humedad.....	52
Tabla 2.6	Características técnicas del medidor de humedad del tipo resistencia	56
Tabla 2.7	Corrección de la humedad de la madera por temperatura.	58
Tabla 2.8	Características de los listones separadores	63
Tabla 2.9.	Tiempo de calentamiento según la densidad de la madera	66
Tabla 2.10	Esquema de calentamiento según el contenido de humedad inicial	67
Tabla 2.11	Factor por el espesor de la madera f_1	73
Tabla 2.12	Factor para maderas frondosas f_2 y f_3	73
Tabla 2.13	Factor para maderas coníferas f_2 y f_3	74
Tabla 2.14	Factor por la velocidad del aire f_4	74
Tabla 2.15	Factor para maderas difíciles de secar f_5	74
Tabla 2.16	Factor por agua libre f_6	74
Tabla 2.17	Plano de Secado literal.....	77
Tabla 2.18	Equilibrio higroscópico inicial para diferentes maderas.....	78
Tabla 2.19	Programas de secado de la JUNAC	81
Tabla 2.20	Programas de secado de la JUNAC, recomendados para algunas	82
Tabla 2.21	Matriz de ponderación para selección del tipo de cámara del secador.....	95
Tabla 2.22	Matriz de ponderación para selección del tipo de sistema de calefacción	96
Tabla 2.23	Matriz de ponderación para selección de combustible.....	97
Tabla 2.24	Consumo de energía térmica para secar 1 kg de agua	97

CAPITULO III

Tabla 3.1	Poder calorífico de residuos de madera	100
Tabla 3.2	Composición másica de la madera	102
Tabla 3.3	Entalpía total de los reactivos H_R	109
Tabla 3.4	Entalpía total de los productos H_P para $T = 1000$ K.....	110
Tabla 3.5	Entalpía total de los productos H_P para diferentes temperaturas ..	110
Tabla 3.6	Entalpía total de los productos H_P para diferentes temperaturas ..	110
Tabla 3.6	Peso molecular de la mezcla de gases PM_M	112
Tabla 3.7	Calor específico de la mezcla de gases CP_M	113
Tabla 3.7	Entalpía total de los productos H_P para diferentes temperaturas ..	111
Tabla 3.8	Viscosidad de la mezcla de los gases	114
Tabla 3.9	Conductividad térmica de la mezcla de gases K_{gc}	115
Tabla 3.10	Selección ventilador.	118
Tabla 3.11	Selección del quemador.....	118

CAPITULO IV

Tabla 4.1	Parámetros de Diseño del Capítulo III	119
Tabla 4.2	Características de la Madera a secar	121
Tabla 4.3	Dimensiones cámara de secado y pila de madera	122
Tabla 4.4	Cantidad de tablonos por coche y por carga de secado	122
Tabla 4.5	Capacidad del secador en m^3 de madera.....	122
Tabla 4.6	Componentes de la camara de secado y de combustion.....	123
Tabla 4.7	Caudal de los ventiladores	125
Tabla 4.8	Característica del ventilador	127
Tabla 4.9.	Densidad y contenido de humedad de la madera.....	131
Tabla 4.10	Tipo de flujo en la cámara de secado	140
Tabla 4.11.	Calculo de nusselts en la cámara de secado.....	141
Tabla 4.12	Coeficiente de convección en la cámara de secado	142
Tabla 4.13	Convección entre la pared de la cámara y el aire ambiente	142
Tabla 4.14	Conducción a través de la pared de la cámara.....	144
Tabla 4.15	Constantes para convección libre.....	145
Tabla 4.16	Convección libre por el flujo del aire atmosférico a través de la pared de la cámara.....	147

Tabla 4.17	Potencia de las pérdidas de calor a través de las paredes	148
Tabla 4.18	Tipo de flujo en la cámara de combustión	150
Tabla 4.19	Cálculo de nusselts en la cámara de combustión	151
Tabla 4.20	Coeficiente de convección en la cámara de combustión.....	151
Tabla 4.21	Convección entre la pared de la cámara de combustión y el aire ambiente	152
Tabla 4.22	Conducción a través de la pared de la cámara de combustión ...	153
Tabla 4.23	Convección libre por el flujo del aire atmosférico a través de la pared de la cámara de combustión.....	156
Tabla 4.24	Potencia de las pérdidas de calor a través de las paredes de la cámara de combustión	157
Tabla 4.25	Potencia para calentar la cámara de secado	159
Tabla 4.26	Potencia para calentar la cámara de combustión	161
Tabla 4.27	Datos a ingresar para el intercambiador de calor	165
Tabla 4.28	Iteraciones del coeficiente global de transferencia de calor	171

CAPITULO V

Tabla 5.1	Código de materiales sistemas	182
Tabla 5.2	Código de materiales de la cámara de secado	182
Tabla 5.3	Código de materiales del sistema de ventilación	183
Tabla 5.4	Código de materiales del sistema de calefacción	183
Tabla 5.5	Código de materiales del sistema de humectación	184
Tabla 5.6	Código de materiales de la cámara de combustión	184
Tabla 5.7	Código de materiales del sistema de control	185
Tabla 5.8	Datos ingresados Cámara de secado.	195
Tabla 5.9	Datos ingresados Cámara de Combustión	199
Tabla 5.10.	Datos ingresados del ducto de la entrada de gases	203
Tabla 5.11.	Datos ingresados del intercambiador de calor.....	207
Tabla 5.12.	Datos ingresados de la pila de madera	211

CAPITULO VI

Tabla 6.1	Cámara de secado.	216
Tabla 6.2	Sistema de ventilación.....	216
Tabla 6.3	Sistema de ventilación.....	217
Tabla 6.4	Sistema de humidificación.	217
Tabla 6.5	Cámara de combustión.....	217
Tabla 6.6	Sistema de control.	218
Tabla 6.7	Mano de obra y otros.....	218
Tabla 6.8	Costos de construcción.	219
Tabla 6.9	Gastos de funcionamiento.	219
Tabla 6.10	Imprevistos	220
Tabla 6.11	Inversión Fija	220
Tabla 6.12	Mano de obra directa.....	220
Tabla 6.13	Mano de obra indirecta.	221
Tabla 6.14	Suministros.....	221
Tabla 6.15	Depreciación de equipos.	222
Tabla 6.16	Costos de producción.....	222
Tabla 6.17	Ganancias netas madera.....	223
Tabla 6.18	Flujo de Caja	223
Tabla 6.19	Valor actual neto.	224
Tabla 6.20	Tasa interna de retorno	225

LISTADO DE DIAGRAMAS

Diagrama 5.1	Diagrama de fabricacion de Cámara de Secado.....	186
Diagrama 5.2	Diagrama de fabricacion del Sistema de Ventilación.....	187
Diagrama 5.3	Diagrama de fabricacion del Sistema de Calefacción.....	188
Diagrama 5.4	Diagrama de fabricacion del Sistema de Humectación.....	189
Diagrama 5.5	Diagrama de fabricacion de la Camara de Combustión.....	190
Diagrama 5.6	Diagrama de Montaje del Secador.....	191

LISTADO DE FIGURAS

CAPITULO I

Figura 1. 1	Ubicación de la provincia Pichincha	3
Figura 1. 2	Ubicación de la provincia Pichincha	3
Figura 1. 3	Elementos de un secador industrial.....	4
Figura 1. 4	Esquema del Secador de Madera	5
Figura 1. 5	Curva Teórica de Secado	6

CAPITULO II

Figura 2. 1	Estructura de la madera	10
Figura 2. 2	Valores de Contracción en las Tres Dimensiones	16
Figura 2. 3	Carta Psicométrica a nivel del Mar	20
Figura 2. 4	Secado convencional de la madera aserrada.....	22
Figura 2. 5	Curva de humedad de equilibrio para madera.....	24
Figura 2. 6	Curva de Histéresis para absorción y desorción de humedad de la madera	26
Figura 2. 7	Contenido de humedad de la madera destinada a distintos usos .	27
Figura 2. 8	Cambio de contenido de humedad durante el secado en relación al espesor de una tabla de madera.	29
Figura 2. 9	Elementos de un secador industrial.....	32
Figura 2. 10	Evaporación del agua libre de la madera	34
Figura 2. 11	Detalle de pared de la cámara de secado	39
Figura 2. 12	Ventiladores colocados sobre las pilas.....	41
Figura 2. 13	Ventiladores colocados sobre la pila en forma transversal	42
Figura 2. 14	Carta Psicométrica a 93,69 KPa (100% Humedad relativa).....	43
Figura 2. 15	Ventilación transversal	44
Figura 2. 16	Ventilación Lateral en ambos lados	45
Figura 2. 17	Vapor a baja presión	46
Figura 2. 18	Vapor a mediana y alta presión	47
Figura 2. 19	Agua caliente a baja presión	47
Figura 2. 20	Calefacción Eléctrica	48
Figura 2. 21	Calentamiento directo	48

Figura 2. 22	Calentamiento con Aceite térmico	49
Figura 2. 25	Pistola medidora de temperatura.....	50
Figura 2. 26	Dispositivo medidor de humedad	52
Figura 2. 27	Carta psicrométrica, aplicable a una presión de 93.69 kPa.	54
Figura 2. 28	Medidor eléctrico de Humedad (Primer método)	55
Figura 2. 29	Comparación del peso de la probeta de madera (Segundo método).....	55
Figura 2. 30	Medidor de humedad del tipo resistencia	56
Figura 2. 31	Probetas para determinar el contenido de humedad de una pieza de madera.....	59
Figura 2. 32	Alineamiento de los separadores en los extremos de la pila	64
Figura 2. 33	Carro especial para el secado artificial con prensado automático de la carga	65
Figura 2. 34	Curva teórica de secado.....	68
Figura 2. 35	Distribución del contenido de humedad con y sin acondicionamiento final en una tabla de 70 mm de espesor.....	69
Figura 2. 36	Tiempo básico de secado para madera conífera	72
Figura 2. 37	Tiempo básico de secado para la madera frondosa	73
Figura 2. 38	Plano de secado.....	76
Figura 2. 39	Proceso de secado.....	78
Figura 2. 40	Forma inadecuada de apilado de piezas de madera	83
Figura 2. 41	Abarquillado	86
Figura 2. 42	Arqueadura	86
Figura 2. 43	Torcedura.....	87
Figura 2. 44	Rajadura.....	87
Figura 2. 45	Toma de probeta para la prueba del tenedor.....	89
Figura 2. 46	Prueba del tenedor	90
Figura 2. 47	Piezas con colapso en Eucalyptus nitens	92
Figura 2. 48	Recuperación de colapso en Eucalyptus nitens	92
Figura 2. 49	Grietas exteriores dirigidas radialmente en la madera aserrada .	93
Figura 2. 50	Condición de esfuerzo durante el secado de la madera que conduce al defecto de endurecimiento	94

CAPITULO III

Figura 3. 1	Carta psicrométrica, aplicable a una presión de 93.69 kPa	106
Figura 3. 2	Ventilador EVISA Centrífugo	118
Figura 3.3	Quemador ECOFLAM Modelo MAIOR P 45.....	118

CAPITULO IV

Figura 4. 1	Cámara de secado y cámara de combustión.....	123
Figura 4. 2	Ubicación de ventiladores y pilas de madera en la cámara de secado.....	124
Figura 4. 3	Ventilador axial evisa modelo AF-6 arreglo 22	127
Figura 4. 4	Intercambiador de calor.....	129
Figura 4. 5	Esquema de las cargas térmicas en el secador de madera (Q) .	130
Figura 4. 6	Aire en condiciones iniciales	133
Figura 4. 7	Psicrometría Condiciones iniciales	134
Figura 4. 8	Aire en condiciones finales	135
Figura 4. 9	Carta Psicométrica Condiciones Finales	136
Figura 4. 10	Distribución de Temperaturas en la Cámara de secado con flujos de calor.....	138
Figura 4. 11	Distribución de las Resistencias Térmicas	139
Figura 4. 12	Distribución de Temperaturas en la Cámara de Combustión con flujos de calor.....	148
Figura 4. 13	Distribución de las Resistencias Térmicas	148
Figura 4. 14	Potencia para calentar instalaciones	157
Figura 4. 15	Aire en condiciones iniciales para evaporar el agua que contiene la madera	162
Figura 4. 16	Aire en condiciones finales-Para evaporar el agua que contiene la madera	163
Figura 4. 17	Esquema de las potencias en el secador de madera	164
Figura 4. 18	Disposición de los tubos en el Intercambiador de calor	167
Figura 4. 19	Esquema de la Analogía eléctrica	170
Figura 4. 20	Pared del tubo de Intercambiador de calor	170
Figura 4. 21	Esquema de los Calores en la Cámara de Secado	174

CAPITULO V

Figura 5. 1	Simbologías utilizadas en el diagrama de construcción.....	181
Figura 5. 2	Logotipo de Algor	192
Figura 5. 3	Interfaz de Algor	193
Figura 5. 4	Mallado cámara de secado	196
Figura 5. 5	Resultado Cámara de secado- Isometría	197
Figura 5. 6	Resultado cámara de secado -Vista frontal	198
Figura 5. 7	Mallado Cámara de Combustión	200
Figura 5. 8	Resultado cámara de combustión - Isometría	201
Figura 5. 9	Resultado cámara de combustión - Vista posterior.....	202
Figura 5. 10	Mallado de ducto de entrada	204
Figura 5. 11	Resultado ducto de entrada - Isometría.....	205
Figura 5. 12	Resultado ducto de entrada - Vista lateral ducto	206
Figura 5. 13	Mallado intercambiador de calor.....	208
Figura 5. 14	Resultado Intercambiador de calor - Isometría.....	209
Figura 5. 15	Resultado Intercambiador de calor - Vista Lateral	210
Figura 5. 16	Mallado pila de madera	212
Figura 5. 17	Resultado Pila de madera - Isometría	213
Figura 5. 18	Resultado Pila de madera - Vista Frontal	214

LISTADO DE ECUACIONES

N°	DESCRIPCIÓN	PAG
2.1	Contenido de Humedad en la madera.....	12
2.2	Contenido de humedad se calcula en función del peso húmedo o..... peso inicial	12
2.3	Relación entre los contenidos de humedad anteriores.....	13
2.4	Densidad de la madera.....	13
2.5	Densidad anhidra.....	13
2.6	Densidad Normal.....	13
2.7	Densidad en el PSF.....	13
2.8	Densidad básica.....	13
2.9	Densidad relativa.....	14
2.10	Contenido máximo de agua en la madera.....	14
2.11	Volumen máximo de las piezas de madera.....	15
2.12	Hinchazón lineal de una pieza de madera.....	16
2.13	Contracción de una pieza de madera.....	17
2.14	Contracción volumétrica.....	17
2.15	Hinchazón volumétrica.....	17
2.16	Gradiente de secado.....	30
2.17	Tiempo de secado en relación al espesor de la madera.....	70
2.18	Tiempo de secado en relación a la temperatura de secado.....	71
2.19	Tiempo de secado en relación a la velocidad de flujo..... de aire dentro de la cámara de secado	71
2.20	Tiempo de secado.....	71
3.1	Relación Aire-Combustible.....	107
3.2	Relación aire – combustible para la ecuación exceso de aire.....	108
3.3	Calor perdido del sistema.....	109
3.4	Entalpia del componente i, a una temperatura T y a..... una presión P	109

N°	DESCRIPCIÓN	PAG
3.5	Peso molecular de la mezcla de gases.....	112
3.6	Densidad de la mezcla.....	112
3.7	Calor específico de la mezcla de gases.....	113
3.8	Viscosidad cinemática de los gases de combustión.....	113
3.9	Viscosidad dinámica de los gases de combustión.....	113
3.10	Coeficiente de difusión de la Teoría Cinética de Shuterland.....	113
3.11	Conductividad térmica de los gases de combustión.....	115
3.12	Numero de prandtl de la mezcla de gases.....	116
3.13	Caudal másico de aire.....	116
3.14	Caudal necesario para el ventilador.....	116
4.1	Longitud interior del secador.....	120
4.2	Longitud total de madera.....	120
4.3	Ancho de la cámara.....	121
4.4	Alto de la pila de madera.....	121
4.5	Número de filas de la pila de madera.....	121
4.6	Caudal proporcionado por los ventiladores.....	124
4.7	Área libre	124
4.8	Área libre lateralmente.....	124
4.9	Caída de presión o resistencia de las pilas de madera.....	125
4.10	Densidad del aire.....	125
4.11	Temperatura media del aire en el secador.....	125
4.12	Área de la sección transversal de las ventilas.....	128
4.13	Dimensión de la ventilas.....	128
4.14	Potencia final.....	130
4.15	Potencia para calentar la madera.....	131
4.16	Masa de la madera.....	131
4.17	Potencia para calentar el agua que contiene.....	132

N°	DESCRIPCIÓN	PAG
4.18	Masa de agua contenida en la madera.....	132
4.19	Potencia para calentar el aire.....	132
4.20	Masa del aire.....	132
4.21	Volumen de aire.....	132
4.22	Potencia para calentar el aire de reposición.....	137
4.23	Variación de temperatura.....	137
4.24	Temperatura media de aire de reposición.....	137
4.25	Caudal másico de aire de reposición.....	137
4.26	Caudal másico del aire.....	137
4.27	Potencia de las pérdidas a través de la cámara de secado.....	139
4.28	Resistencia térmica total de la cámara de secado.....	139
4.29	Número de Reynolds.....	140
4.30	Numero de Nusselt de la cámara de secado para flujo laminar.....	141
4.31	Numero de Nusselt de la cámara de secado para flujo turbulento.....	141
4.32	Coeficiente de transferencia de calor por convección.....	141
4.33	Resistencia Térmica por convección forzada aire.....	142
4.34	Resistencia térmica por conducción a través de la pared de la cámara...	143
4.35	Temperatura media.....	143
4.36	Coeficiente de dilatación cubica.....	144
4.37	Numero de Grasshoft.....	144
4.38	Número de Nusselt en convección natural en la cámara de secado.....	145
4.39	Coeficiente de transferencia de calor por convección libre.....	146
4.40	Resistencia Térmica por convección libre por el flujo del aire.....	146
	atmosférico a través de la cámara	
4.41	Potencia de las pérdidas a través de la cámara de combustión.....	149
4.42	Resistencia térmica total de la cámara de combustión.....	149
4.43	Numero de Nusselt de la cámara de combustión para flujo laminar.....	150
4.44	Numero de Nusselt de la cámara de combustión para flujo turbulento....	150
4.45	Coeficiente de transferencia de calor por convección en la cámara de...	151
	combustión	
4.46	Resistencia Térmica por convección forzada aire caliente- pared.....	152
4.47	Resistencia térmica por conducción a través de la pared de la cámara...	152

	De combustión	
4.48	Temperatura media de la cámara de combustión.....	152
4.49	Coeficiente de transferencia de calor por convección libre en la.....	155
	Cámara de combustión	
4.50	Resistencia Térmica por convección libre por el flujo del aire.....	155
	Atmosférico a través de la cámara de combustión	
4.51	Potencia para calentar las instalaciones.....	158
4.52	Potencia para calentar la cámara de secado.....	158
4.53	Masa.....	158
4.54	Volumen.....	158
4.55	Igualdad de potencias en la cámara de secado.....	158
4.56	Temperatura interior de la cámara de secado.....	158
4.57	Temperatura exterior de la cámara de secado.....	158
4.58	Potencia para calentar la cámara de combustión.....	160
4.59	Masa de la cámara de combustión.....	160
4.60	Volumen de la cámara de combustión.....	160
4.61	Igualdad de potencias en la cámara de combustión.....	160
4.62	Temperatura interior de la cámara de combustión.....	160
4.63	Temperatura exterior de la cámara de combustión.....	160
4.64	Potencia para evaporar el agua que contiene la madera.....	162
4.65	Variación de la temperatura de salida de los gases de combustión.....	165
	con la de entrada del aire	
4.66	Variación de la temperatura de entrada de los gases de combustión.....	165
	con la de salida del aire	
4.67	Diferencia media logarítmica de temperatura.....	165
4.68	Coeficiente de temperatura R.....	165
4.69	Coeficiente de temperatura P.....	166
4.70	Diferencia media logarítmica de temperatura corregida.....	166
4.71	Calor necesario para el intercambiador de calor.....	166
4.72	Área de transferencia de calor.....	167
4.73	Dimensión del paso diagonal.....	168
4.74	Velocidad máxima del aire.....	168
4.75	Numero de Reynolds para el aire.....	168
4.76	Nusselts para el aire.....	168

4.77	Temperatura media del aire.....	169
4.78	Temperatura media de los gases de combustión.....	169
4.79	Temperatura de salida.....	169
4.80	Coeficiente de transferencia de calor del aire.....	169
4.81	Reynolds para los gases de combustión.....	169
4.82	Numero de nusselts en los gases de combustión.....	169
4.83	Coeficiente de transferencia de calor de los gases de combustión.....	169
4.84	Coeficiente global de transferencia de calor.....	170
4.85	Caídas de presión.....	172
4.86	Eficiencia del secador.....	172
4.87	Calor suministrado.....	172
4.88	Potencia de operación.....	172
4.89	Potencia de pérdidas.....	172
4.90	Eficiencia teórica del secador.....	174
4.91	Caudal volumétrico de humo en la chimenea.....	175

LISTADO DE ANEXOS

ANEXO A	PLANOS
ANEXO B	TABLAS PROPIEDADES TERMOFISICAS DE LA MATERIA
ANEXO C	MANUAL AUTODESK ALGOR SIMULATION

NOMENCLATURA UTILIZADA

VARIABLE	DESCRIPCIÓN	UNIDADES
CH	Contenido de humedad en la madera	%
m_h	Masa de la madera humedad	kg
m_{agua}	Masa de agua	kg
m_0	Masa de la madera anhidra (0% de humedad)	kg
CH_p	Contenido de humedad en función del peso húmedo o peso inicial	%
ρ	Densidad de la madera	kg/m ³
m	Masa de una pieza de madera a un determinado contenido de humedad	kg
V	Volumen de la pieza a igual contenido de humedad	m ³
ρ_A	Densidad Anhidra	kg/m ³
ρ_N	Densidad normal	kg/m ³
ρ_F	Densidad en el punto de saturación de las fibras	kg/m ³
ρ_B	Densidad básica	kg/m ³
ρ_R	Densidad relativa (anhidra, normal o básica)	kg/m ³
ρ_{agua}	Densidad del agua en condiciones normales	kg/m ³
CH_{max}	Contenido máximo de agua en la madera	
V_{max}	Volumen máximo de la pieza de la madera	m ³
α	Hinchazón longitudinal, tangencial o radial	%
d_f	Dimensión longitudinal, tangencial o radial de la pieza de la madera	m

d_w	Dimensión longitudinal, tangencial o radial de la pieza de madera	m
V_o	Volumen de la madera seca al horno	m ³
ρ_{RA}	Densidad relativa anhidra	
β	Contracción longitudinal, tangencial o radial	%
β_T	Dirección tangencial	
β_R	Dirección radial	
β_L	Dirección longitudinal	
β_v	Contracción volumétrica	
α_v	Hinchazón volumétrica	
α_L	Hinchazón longitudinal	
α_T	Hinchazón tangencial	
α_R	Hinchazón radial	
G_h	Contenido de humedad del aire	%
G_{ho}	Contenido de humedad de saturación	%
HR	Humedad relativa	%
P	Presión parcial de vapor de agua	Pa
P_o	Presión de vapor saturado	Pa
HA	Humedad absoluta del aire	
HA_o	Humedad absoluta saturada	
GS	Gradiente de secado	
CH_{real}	Contenido de humedad real	%

ECM	Contenido de humedad de equilibrio	%
t_1	Tiempo de secado conocido	horas
t_2	Tiempo de secado desconocido	horas
e_1	Espesor de la madera de tiempo de secado conocido	mm
e_2	Espesor de la madera de tiempo de secado desconocido	mm
m	Índice que está en función del espesor de la madera	
T_1	Temperatura aplicada para el tiempo de secado conocido	horas
T_2	Temperatura aplicada para el tiempo de secado desconocido	horas
t_s	Tiempo de secado	horas
K	Factor de proporcionalidad de la madera	
e	Espesor de la madera	mm
T	Temperatura de secado	°C
v	Velocidad del aire	m/s
ϑ_1	Velocidad del aire aplicada para el tiempo de secado conocido	m/s
ϑ_2	Velocidad del aire aplicada para el tiempo de secado desconocido	m/s
CH_i	Contenido de humedad inicial	%
CH_f	Contenido de humedad inicial	%
$t_{Hasta PSF}$	Tiempo hasta el punto de saturación de las fibras	horas

$t_{\text{Bajo PSF}}$	Tiempo bajo el punto de saturación de las fibras	horas
t_{Secado}	Tiempo de secado	horas
$t_{\text{Calentamiento}}$	Tiempo de calentamiento	horas
$t_{\text{Acondicionamiento}}$	Tiempo de acondicionamiento	horas
$t_{\text{Enfriamiento}}$	Tiempo de enfriamiento	horas
$t_{\text{Total de secado}}$	Tiempo de secado	horas
A/C	Relación aire combustible	
n_{aire}	Número de moles de aire	
n_{comb}	Número de moles de combustible	
$\left(\frac{A}{C}\right)_{\text{est}}$	Relación aire combustible para la ecuación estequiométrica	
$\left(\frac{A}{C}\right)_{\text{ex}}$	Relación aire combustible para la ecuación exceso de aire	
$\left(\frac{A}{C}\right)_{200\%}$	Relación aire combustible para la ecuación exceso de aire al 200%	
Q	Calor perdido desde el sistema	kJ
H_p	Entalpia total de los productos	kJ
H_R	Entalpia total de los reactivos	kJ
$(h_{T,P})_i$	Entalpia del componente i, a una temperatura T y una presión P	kJ
$(h_f^{\circ})_{298K, i, \text{est}}$	Entalpia de formación del componente i	kJ
PM_{mez}	Peso molecular de la mezcla de gases	kg/kgmol

x_i	Fracción molar del componente i	
P_{M_i}	Peso molecular del componente i	kg / kgmol
ρ	Densidad de la mezcla	kg/m ³
P	Presión atmosférica	mm Hg
R	Constante universal de los gases	$\frac{J}{kg\ mol\ ^\circ C}$
T	Temperatura media	°C
CP_{gc}	Calor específico de la mezcla de gases	J/(kgmol °C)
CP_i	Calor específico del componente i	J/(kgmol °C)
CP_{gc}	Calor específico de la mezcla de gases	J/(kg °C)
ν_{gc}	Viscosidad cinemática de la mezcla de gases	m/s ²
ρ_{gc}	Densidad de la mezcla de gases	kg/m ³
μ_{gc}	Viscosidad dinámica o absoluta de la mezcla de gases	Pa-s
D_{ij}	Coeficiente de difusión de la Teoría cinética de shuterland	
k_{gc}	Conductividad térmica de la mezcla de gases	$\frac{W}{m\ ^\circ C}$
k_i	Conductividad térmica del componente i	$\frac{W}{m\ ^\circ C}$
A_{ij}	Función aún no especificada	
Pr_{gc}	Numero de prandtl de la mescla de gases	
CP_{gc}	Calor específico de la mezcla de gases	$\frac{J}{kg\ ^\circ C}$

Pr_{gases}	Numero de prandtl de la mezcla de gases	
\dot{m}_c	Consumo de combustible	kg/s
\dot{m}_{aire}	Caudal másico de aire	kg.aire/s
ρ_{aire}	Densidad del aire @ Tamb	kg/m ³
Caudal	Caudal necesario para el ventilador	m ³ /s
PM_{gases}	Peso molecular de la mezcla	kg/kg mol
m_{gases}	Masa de los gases de combustión	kg/kg combustible
\dot{m}_{gases}	Caudal másico de los gases de combustión	kg/s
V	Caudal proporcionado por los ventiladores	m ³ /s ; CFM
A_L	Área libre	m ²
v	Velocidad recomendada del aire	m/s
e_s	Espesor de los separadores	m
e_m	Espesor de la madera	m
L_{total}	Longitud total de madera	m
h	Altura de la pila de madera	m
A_L	Área libre lateralmente	m ²
L_2	Longitud interior del secador	m
λ	Factor de aspereza de la madera	(0.02-0.08)

b	Ancho de las 2 pilas	m
v	Velocidad del aire	m/s
ρ_{aire}	Densidad del aire	kg/m ³
e_s	Espesor de los separadores	m
T_{ma}	Temperatura media del aire en el secador	°C
T_{ce}	Temperatura inicial de calentamiento	°C
T_f	Temperatura final	°C
P	Presión atmosférica en Santo domingo de los Tsáchilas	Pa
ΔP	Caída de presión o resistencia de las pilas de madera	Pa
A_v	Área de la sección transversal de las ventilas	m ²
Q_{aire}	Volumen de aire de reposición por unidad de tiempo	m ³ /s
n_v	Numero de ventilas de entrada y salida	c/u
v_{aire}	Velocidad de aire	m/s
b_v	Dimensión de la ventilas	m
ρ_{m}	Densidad de la madera	kg/m ³
V_{m}	Volumen total de la madera	m ³
M_{m}	Masa de la madera	kg
$C_{p,m}$	Calor específico de la madera	$\frac{J}{kg^{\circ}C}$
T_{es}	Temperatura Inicial de secado	°C
T_{amb}	Temperatura ambiente	°C

t	Tiempo de calentamiento (8 horas)	s
Q_{cal}	Potencia para calentar la madera	W
m_{ca}	Masa de agua contenida en la madera	kg
m_{ma}	Masa de la madera	kg
CH_v	Contenido de humedad de la madera en estado verde	%
$C_{p_{ca}}$	Calor específico del agua	$\frac{J}{kg^{\circ}C}$
Q_{ca}	Potencia para calentar el agua que contiene la madera	W
$\rho_{a_{aire}}$	Densidad del aire	$\frac{kg}{m^3}$
$V_{a_{aire}}$	Volumen del aire	m^3
$m_{a_{aire}}$	Masa del aire	kg
V_s	Volumen del secador	m^3
V_{ma}	Volumen de la madera	m^3
$T_{m_{mc}}$	Temperatura media	$^{\circ}C$
HR_i	Humedad relativa en condiciones iniciales	%
HR_f	Humedad relativa en condiciones finales	%
P_{vap_f}	Presión de vapor final	Pa
P_{vap_i}	Presión de vapor inicial	Pa
P_s	Presión de saturación	Pa
α_c	Coficiente específico de humedad	$\frac{kg \text{ vapor}}{kg \text{ madera seco}}$
α_i	Coficiente específico de humedad inicial	$\frac{kg \text{ vapor}}{kg \text{ madera seco}}$

μ_f	Coeficiente específico de humedad final	$\frac{\text{Kg vapor}}{\text{Kg aire seco}}$
PM_{vapor}	Peso molecular del vapor de agua	kg
PM_{aire}	Peso molecular del aire	kg
C_p	Calor específico del aire	$\frac{\text{J}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$
$h_{\text{aire seco}}$	Entalpía del aire seco	$\frac{\text{J}}{\text{kg}}$
h_{vapor}	Entalpía en condiciones finales del vapor de agua	$\frac{\text{J}}{\text{kg}}$
h_{vapor}	Entalpía en condiciones iniciales del vapor de agua	$\frac{\text{J}}{\text{kg}}$
h_2	Entalpía final del aire húmedo	$\frac{\text{J}}{\text{kg}}$
h_1	Entalpía inicial del aire húmedo	$\frac{\text{J}}{\text{kg}}$
Q_{calent}	Potencia para calentar el aire	W
$\dot{m}_{\text{reposición}}^{10\%}$	Caudal másico de aire de reposición (10% del caudal másico de aire)	Kg/s
C_p	Calor específico del aire	J/kg °K
T_{media}	Temperatura media	°C
T_{inicial}	Temperatura inicial de calentamiento	°C
T_f	Temperatura final	°C
ΔT	Variación de temperatura	°C
\dot{m}_{aire}	Caudal másico del aire	Kg/s
\dot{V}_{aire}	Caudal de aire (obtenido al inicio)	m ³ /s

ρ_{aire}	Densidad del aire	Kg/m ³
Q_{reempl}	Potencia para calentar el aire de reposición	W
Q_{p1}	Potencia de las pérdidas a través de la cámara de secado	W
T_f	Temperatura final	°C
T^{amb}	Temperatura ambiente	°C
R_{tot1}	Resistencia térmica total de la cámara de secado	°C/W
R_{conv1}	Resistencia térmica por convección entre el aire caliente y la pared de la cámara	°C/W
R_{cond}	Resistencia térmica por conducción a través de la pared de la cámara	°C/W
R_{conv2}	Resistencia térmica por convección libre entre la pared de la cámara y el aire ambiente	°C/W
Re_1	Número de Reynolds	
v_1	Velocidad del aire	m/s
L_c_1	Longitud característica	m
ν_1	Viscosidad cinemática	m ² /s
Nu_1	Numero de Nusselt	
Pr_1	Numero de Prandtl	
h_1	Coficiente de transferencia de calor por convección	W/m ² °C
k_1	Conductividad Térmica del aire	W/m °C
A_1	Área de las paredes	m ²
e_1	Espesor	m

β	Coeficiente de dilatación cubica	1/K
Gr_1	Numero de Grasshoft	
g	Aceleración de la gravedad	m/s ²
ΔT_1	Diferencia de temperatura en convección libre	°C
T_m	Temperatura media	°C
Nu_2	Numero de nusselts	
C	Constante para convección libre promedio	
m	Constante para convección libre promedio	
k_2	Conductividad Térmica del aire	W/m °C
h_2	Coeficiente de Convección	W/m ² °C
A_2	Área de las paredes	m ²
$Q_{p,amb}$	Potencias individuales de las pérdidas a través de la cámara de secado	W
Q_{p2}	Potencia de las pérdidas de calor a través de las paredes de la cámara de combustión	W
$Q_{p,amb,comb}$	Potencias individuales de las pérdidas de calor a través de las paredes de la cámara de combustión	W
$T_{f,gc}$	Temperatura final de los gases de combustión	°C
$R_{T,2}$	Resistencia térmica total de la cámara de combustión	°C/W
$R_{C,23}$	Resistencia térmica por convección entre el aire caliente y la pared de la cámara de combustión	°C/W
$R_{C,21}$	Resistencia térmica por conducción a través de la pared de la cámara de combustión	°C/W
$R_{C,2}$	Resistencia térmica por convección libre entre la pared dela cámara de combustión y el aire ambiente	°C/W
Re_2	Número de Reynolds	

v_2	Velocidad en la cámara de combustión (1.5-15)	m
L_{c2}	Longitud característica	m/s
ν_2	Viscosidad cinemática	m ² /s
Nu_{c2}	Numero de Nusselt de la cámara de combustión	
Pr_2	Numero de Prandtl de la cámara de combustión	
h_{c2}	Coefficiente de transferencia de calor por convección	W/m ² °C
k_{a2}	Conductividad Térmica del aire	W/m °C
R_{c2}	Resistencia Térmica por convección forzada aire caliente- pared	°C/W
A_{c2}	Área de las paredes de la cámara de combustión	m ²
R_{c2}	Resistencia térmica por conducción a través de la pared de la cámara de combustión	°C/W
δ_2	Espesores de la cámara de combustión	m
k_2	Coefficiente de conductividad térmica	W/m °C
$T_{m,c2}$	Temperatura media de la cámara de combustión	°C
Gr_2	Numero de Grasshoft	
Nu_{c2}	Numero de nusselts	
h_{c2}	Coefficiente de transferencia de calor por convección libre	W/m ² °C
k_{a2}	Conductividad Térmica del aire	
A_2	Área de las paredes	m ²
Q_{c2}	Potencia para calentar las instalaciones	W
Q_{s2}	Potencia para calentar la cámara de secado	W
Q_{cc2}	Potencia para calentar la cámara de combustión	W

m	Masa de las paredes, techo, piso, puerta	kg
A	Área de las paredes, techo, piso, puerta	m ²
e	Espesor de las paredes, techo, piso, puerta	m
ρ	Densidad de acuerdo al material	kg/m ³
V	Volumen	m ³
C_p	Calor específico de las paredes, techo, piso, puerta	J/kg °K
t	Tiempo de calentamiento	s
T_s	Temperatura interior de la cámara de secado	°C
T_{e_s}	Temperatura exterior de la cámara de secado	°C
T_f	Temperatura final	°C
m_{sec}	Masa de las paredes, techo, piso, puerta	kg
A_{sec}	Área de las paredes, techo, piso, puerta	m
ρ_{sec}	Densidad de acuerdo al material	kg/m ³
V_{sec}	Volumen	m ³
$C_{p_{\text{sec}}}$	Calor específico de las paredes, techo, piso, puerta	J/kg °K
$T_{i_{\text{sec}}}$	Temperatura interior de la cámara de combustión	°C
$T_{e_{\text{sec}}}$	Temperatura exterior de la cámara de combustión	°C
Q_{e_c}	Potencia para evaporar el agua que contiene la madera	W
Q	Potencia de arranque	W
F_s	Factor de seguridad	
$T_{e_{\text{aire}}}$	Temperatura de entrada del aire	°C

T_{ge}	Temperatura de entrada de los gases de combustión	°C
$T_{s,aire}$	Temperatura de salida del aire	°C
$T_{s,ge}$	Temperatura de salida de los gases de combustión	°C
\dot{m}_{aire}	Flujo másico del aire	$\frac{W}{m^2}$
\dot{m}_{ge}	Flujo másico de los gases de combustión	$\frac{W}{m^2}$
$C_{p,aire}$	Calor específico del aire	$\frac{J}{Kg \cdot K}$
$C_{p,ge}$	Calor específico de los gases de combustión	$\frac{J}{Kg \cdot K}$
μ_{aire}	Viscosidad dinámica del aire	$\frac{W}{m^2}$
μ_{ge}	Viscosidad dinámica de los gases de combustión	$\frac{W}{m^2}$
ρ_{aire}	Densidad del aire	$\frac{Kg}{m^3}$
ρ_{ge}	Densidad de los gases de combustión	$\frac{Kg}{m^3}$
k_{aire}	Conductividad térmica del aire	$\frac{W}{m \cdot K}$
k_{ge}	Conductividad térmica de los gases de combustión	$\frac{W}{m \cdot K}$
Pr_{aire}	Numero de prandtl del aire	
Pr_{ge}	Numero de prandtl de los gases de combustión	
$DMLT$	Diferencia media logarítmica de temperatura	
F	Factor de corrección	
$DMLT_c$	Diferencia media logarítmica de temperatura corregida	

$\frac{D_o}{D_i}$	Coeficiente para el cálculo del factor de corrección del DMLT	
$\frac{D_o}{D_i}$	Coeficiente para el cálculo del factor de corrección del DMLT	
do	Diámetro exterior de la tubería	m
di	Diámetro interior de la tubería	m
espesor	Espesor de la tubería	m
L	Longitud de la tubería	m
K	Coeficiente de conductividad del acero	W/m °K
A	Área	m ²
U _o	Coeficiente global de transferencia de calor	$\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K}$
$\frac{D_o}{D_i}$	Numero de tubos	
ST	Paso Transversal	m
SL	Paso Longitudinal	m
SD	Paso Diagonal	m
NL	Número de hileras de tubos Longitudinal	
NT	Número de hileras de tubos transversal	
Np	Número de pasos en los tubos	
$\frac{D_o}{D_i}$	Velocidad máxima del aire	m/s
$\frac{D_o}{D_i}$	Número de Reynolds para el aire	
$\frac{D_o}{D_i}$	Numero de prandtl a la temperatura de película	
$\frac{D_o}{D_i}$	Temperatura media del aire	°C
$\frac{D_o}{D_i}$	Temperatura media de los gases de combustión	°C
$\frac{D_o}{D_i}$	Temperatura de película	°C

Nu_{aire}	Numero de nusselts del aire	
h_{aire}	Coeficiente de convección del aire	$W/m^2\text{°C}$
Re_{ge}	Número de Reynolds para los gases de combustión	
Pr_{ge}	Número de prandtl para los gases de combustión	
h_{ge}	Coeficiente de convección para los gases de combustión	$W/m^2\text{°C}$
R_{ob}	Factor de obstrucción para los gases de combustión	$\frac{m^2 \cdot K}{W}$
R_{ob}	Factor de obstrucción para el aire	$\frac{m^2 \cdot K}{W}$
f	Factor de fricción	
X	Factor de corrección	
η_T	Eficiencia teórica del secador	%
t_{evap}	Tiempo para evaporar el agua	s
Q_o	Potencia de operación	W
Q_c	Calor total suministrado para el proceso de secado	J
Q_{evap}	Calor utilizado para evaporar el agua	J
Q_{caudal}	Caudal volumétrico de humo en la chimenea	m^3/s
A_{cd}	Área de la sección transversal del conducto	m^2
$Coef$	Coeficiente de descarga (~ 0.65 a 0.70)	
H_c	Altura de la chimenea	m

CAPÍTULO I

INTRODUCCION

1.1.ANTECEDENTES

El secado es uno de los tratamientos de gran importancia y complejidad en la elaboración de la madera. Cuando el árbol está recién cortado posee un alto contenido de humedad, el cual varía según la época del año, región de procedencia, especie y densidad, entre otros. Usualmente, una gran proporción de agua debe ser removida de la madera para que ésta pueda ser utilizada adecuadamente. Esto se debe a que la madera puede sufrir una serie de complicaciones cuando se utiliza con altos contenidos de humedad, como por ejemplo variación de sus dimensiones, contracciones e hinchamientos indeseados, la aparición de torceduras, grietas o rasgaduras, etc.

Entre las principales justificaciones que existen para secar la madera, se encuentran: reducción del peso, estabilización de sus dimensiones, mejora en sus propiedades de resistencia, aumento de la resistencia a la pudrición y mancha, mejora en la trabajabilidad, mejora en la resistencia de las uniones, mejoras en la aplicación de pinturas y barnices.

La madera es un material higroscópico, es decir, absorbe o libera humedad en función de las condiciones de temperatura y humedad del ambiente en que se encuentra. Los factores que influyen en el secado de la madera se dividen en: Aquellos que dependen del aire como: la temperatura, humedad relativa del aire y la velocidad del aire.

Aquellos que dependen de las características de la madera como: contenido de humedad, la densidad y el espesor de las piezas a secar, entre otros.

La humedad del aire es la cantidad de vapor de agua que hay en el aire. Esta no se suele indicar en términos absolutos, sino en forma de un parámetro denominado "humedad relativa". Este valor se obtiene al comparar la humedad del aire con la cantidad de humedad que éste es capaz de llegar a contener. Por

lo tanto, la humedad relativa del aire se define como la cantidad de agua presente en el aire, respecto a la máxima cantidad que podría tener a una misma temperatura.

Una humedad relativa del 100% significa un ambiente en el que no cabe más agua. El cuerpo humano no puede transpirar y la sensación de calor puede llegar a ser asfixiante. Corresponde a un ambiente húmedo y la madera en estas condiciones no puede liberar humedad al ambiente. Una humedad del 0% corresponde a un ambiente seco en el cual se transpira con facilidad. La madera en estas condiciones libera agua al ambiente, disminuyendo su contenido de humedad.

Cuando la humedad relativa del aire alcanza el valor del 100% se produce el fenómeno de condensación que se observa en la vida diaria. El rocío en las mañanas de invierno se debe a que la humedad relativa del aire ha alcanzado el 100% y el aire no admite ya más agua. Entonces el agua condensa en forma líquida en superficies metálicas, hojas, flores etc. También se alcanza el 100% de humedad cuando se usa agua muy caliente en un recinto cerrado como por ejemplo un cuarto de baño. El agua caliente se evapora fácilmente y el aire de la habitación alcanza con rapidez el 100% de humedad. El resultado es de todos conocidos, se empañan (se humedecen) los espejos.

Un principio del secado es que la humedad se mueve desde sectores de mayor hacia sectores con menor contenido de humedad. Si el aire que rodea a una pieza de madera permite más vapor de agua entonces, al aplicar temperatura, el agua presente al interior de la madera podrá llegar a la superficie de ésta, ya sea por capilaridad o difusión, y podrá ser removida por el aire circulante.

Cuando se seca madera al aire libre, las condiciones ambientales no pueden ser totalmente controladas, por lo que ésta alcanzará con el tiempo una humedad de equilibrio con el ambiente, la cual variará para diferentes zonas geográficas. Otra forma de secar madera, en un tiempo mucho más corto que el secado al aire y a un menor contenido de humedad, es mediante la utilización de

un horno de secado. En éste se pueden controlar las condiciones ambientales utilizando radiadores para aportar calor, chimeneas o ventilas para regular la humedad y temperatura del ambiente y ventiladores para hacer circular el aire entre la piezas de madera, extrayendo la humedad de ésta.

Antiguamente los secadores industriales de madera utilizaban psicrómetros como instrumento de control, los cuales se instalaban en el interior del secador y los valores de los termómetros de los bulbos seco y húmedo, podían ser observados a través de una ventanilla habilitada en una de las paredes de éste. En la actualidad existen modernos sistemas de control automatizados, sin embargo, los principios siguen siendo los mismos.

Comprender el concepto de humedad relativa del aire y como regularla, es de vital importancia en el control de los procesos industriales de secado de la madera como en hornos.

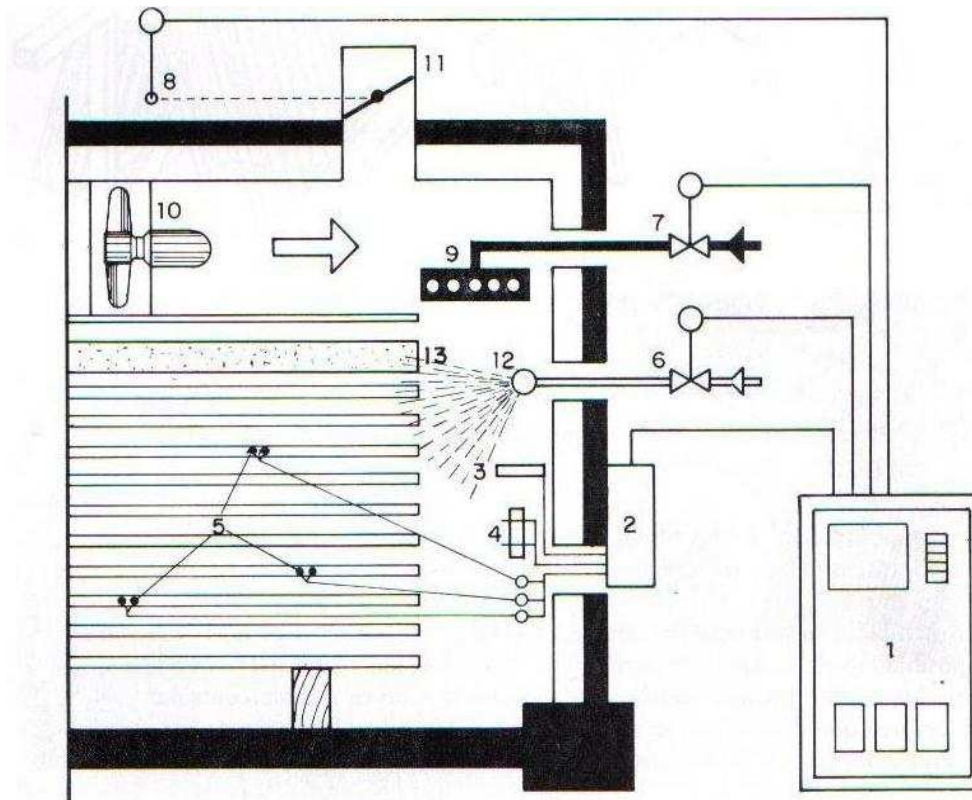
El ámbito de acción de nuestro proyecto es en las instalaciones de la Escuela Politécnica del Ejército.



Figura 1. 2 Ubicación de la provincia Pichincha

Las partes constitutivas de un secador de madera son:

- Cámara de secado
- Sistema de Ventilación
- Sistema de Calefacción
- Sistema de Humectación
- Sistema de Control



- 1.- Equipo de Control
- 2.- Identificador de valores
- 3.- Sensor de Temperatura
- 4.- Sensor del clima
- 5.- Puntos de Medición del contenido de humedad
- 6.- Motoválvula para la humidificación
- 7.- Motoválvula de Calefacción
- 8.- Control de las válvulas de entrada y salida de aire
- 9.- Radiadores
- 10.- Ventilador
- 11.- Válvula de entrada y salida de aire
- 12.- Tobera de Humidificación

Figura 1. 3 Elementos de un secador industrial

Para el desarrollo del presente proyecto se propone del siguiente esquema.

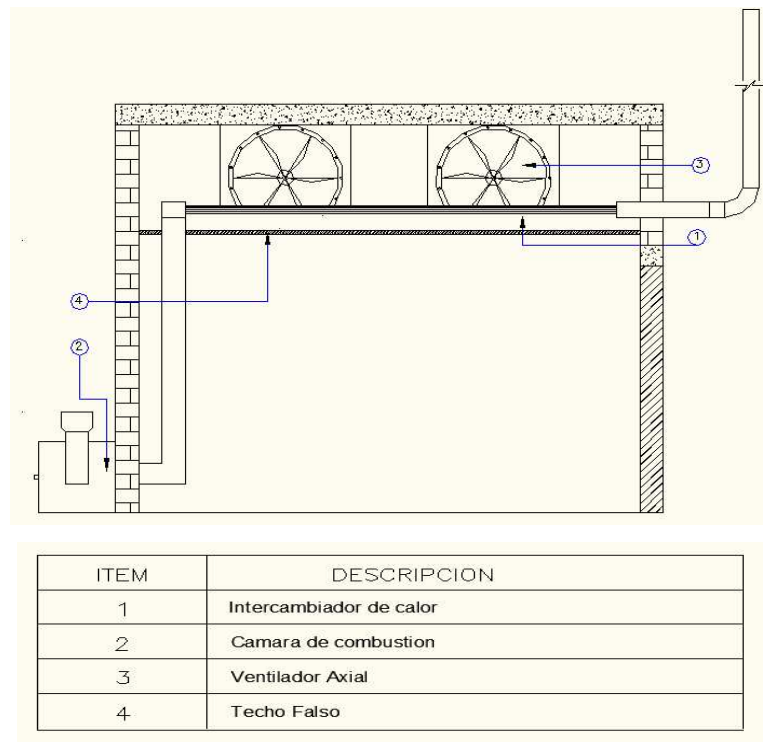


Figura 1. 4 Esquema del Secador de Madera

Las fases a considerar en el secado de la madera son:

Fase de calentamiento: Se eleva la Temperatura hasta el primer valor deseado, por lo tanto es importante que en esta fase la madera no empiece a secarse, ya que producirá defectos como el endurecimiento y en casos extremos el colapso y para esto lo hacemos con la Humedad relativa del aire para que se rehumecte superficialmente y por lo tanto lograr una homogénea humedad hacia el interior de la pieza de la madera.

Fase de Secado: Se divide en 2 etapas:

En la primera fase se reduce la humedad de la madera desde su estado verde (Humedad inicial) hasta el Punto de saturación de las fibras (PSF) con una velocidad de secado permanente constante, bajo temperatura y humedad relativa del aire estables.

En la segunda fase continua el secado desde el PSF hasta en contenido de humedad final.

Fase de acondicionamiento: Se uniformiza la humedad dentro de la madera disminuyendo el gradiente de humedad (GH).

Hay que bajar la temperatura para que la cámara esté en condiciones climáticas y que el Contenido de humedad de equilibrio (ECH) sea ligeramente mayor al contenido de humedad superficial (CHS) de la madera.

El tiempo de acondicionamiento depende de: el espesor de la madera, del GH y de la especie.

Fase de enfriamiento: Se desconecta el sistema de calefacción y se abren las ventilas para el intercambio del aire caliente con el exterior.

Se baja la temperatura progresivamente hasta la temperatura exterior, que sea similar a la diferencia psicométrica en la fase de acondicionamiento.

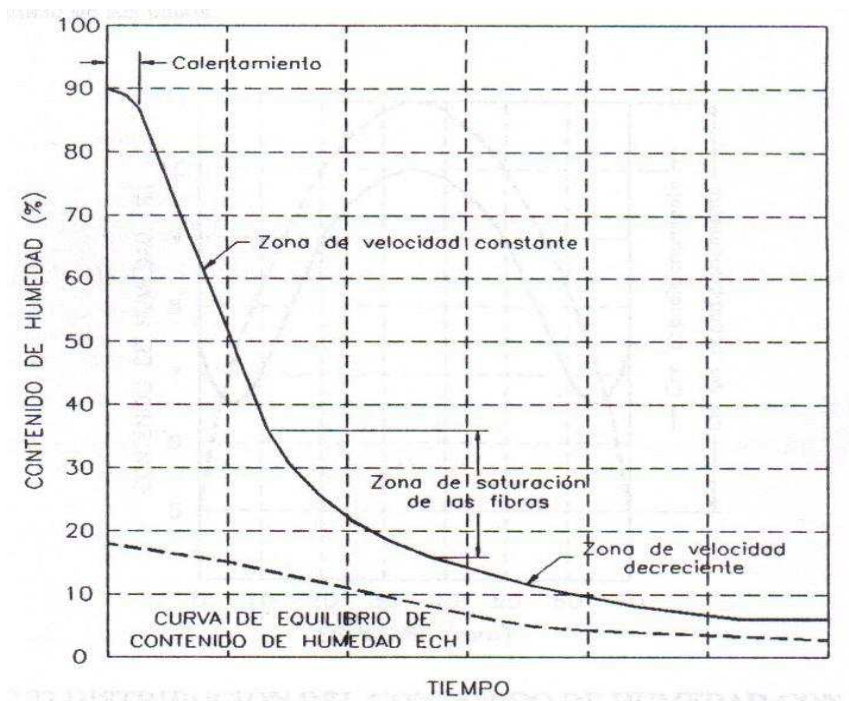


Figura 1. 5 Curva Teórica de Secado

Debido al proceso de secado artificial podremos lograr eliminar el excedente de agua en la madera en forma rápida y económica, minimizando los defectos que se producen; así como también alcanzar mayor resistencia, resiste mejor al ataque de hongos y tiene una mayor estabilidad dimensional.

1.2.POLITICA AMBIENTAL

- Esforzarse para mejorar continuamente el manejo ambiental de acuerdo a las metas del proyecto que se ha propuesto.
- Aprovechar óptimamente los residuos de los árboles cuando estos son convertidos en trozas, sea como materia prima para la combustión.
- Estar continuamente informados y entrenados en aspectos ambientales.

1.3.OBJETIVOS

1.3.1.OBJETIVO GENERAL

Diseñar y Simular el funcionamiento del secador de madera, de flujo forzado para disminuir la humedad de la madera a una humedad requerida, utilizando un quemador de biomasa.

1.3.2.OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Diseñar el sistema de calefacción y su respectivo intercambiador de calor necesario para secar la madera.
- Simular el funcionamiento del secador de madera en base al software especializado ALGOR versión 12.26.
- Determinar los equipos a ser utilizados en el secador de madera.
- Determinar las condiciones de operación del secador de madera.
- Calcular las propiedades de los gases de combustión, en base a la investigación de la biomasa utilizada.

1.4. ALCANCE DEL PROYECTO

Si bien es posible secar la madera al aire, en forma natural, el secado artificial constituye la única alternativa para poder cumplir estrictamente con las exigencias del actual sector maderero.

El alcance de nuestro proyecto se va orientado al diseño del secador de madera en base a un sistema de calentamiento indirecto y el análisis termográfico, a partir de la simulación del secador de madera, utilizando el programa especializado ALGOR.

1.5. JUSTIFICACIÓN

El secado de madera constituye una de las etapas más importante del proceso de preparación de madera para la remanufactura, tendiente a obtener productos finales con alto valor agregado.

Este diseño está enfocado a generar distintas condiciones teóricas de funcionamiento de la cámara, determinado las condiciones óptimas de secado.

El Software especializado ALGOR nos ayuda a simular el secado de madera mediante la utilización de los cálculos obtenidos en el diseño, de esta forma abalizamos que los resultados obtenidos del diseño sean correctos. Se espera que este proyecto sirva de base para futuros proyectos que conlleven a obtener mejores secadores de madera, que permitan alcanzar una mayor eficiencia térmica.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1.CONCEPTOS BÁSICOS DE LA MADERA

2.1.1. DEFINICIÓN DE MADERA

La madera es un material biológico duro y resistente compuestos por fibras de celulosa unidas con lignina, las cuales son huecas en el interior, de ahí su naturaleza porosa¹.

2.1.2. ESTRUCTURA ANATÓMICA DE LA MADERA

La madera, como parte fundamental del tronco de los árboles tiene funciones de sostén de ramas y transporte de alimentos. Esto le confiere al material, características como porosidad (presencia de espacios vacíos) y elevada resistencia mecánica en relación con su peso, lo que origina que sus propiedades se manifiesten en diferente magnitud según las direcciones de corte.

2.1.3. PARTES DEL TRONCO

Si hacemos un corte transversal en tronco de un árbol se puede observar las siguientes partes:

¹ Manual del Grupo Andino para el secado de maderas, Junta del Acuerdo de Cartagena, Primera edición. pp. 1-3. Lima. Copyrigh. 1989.

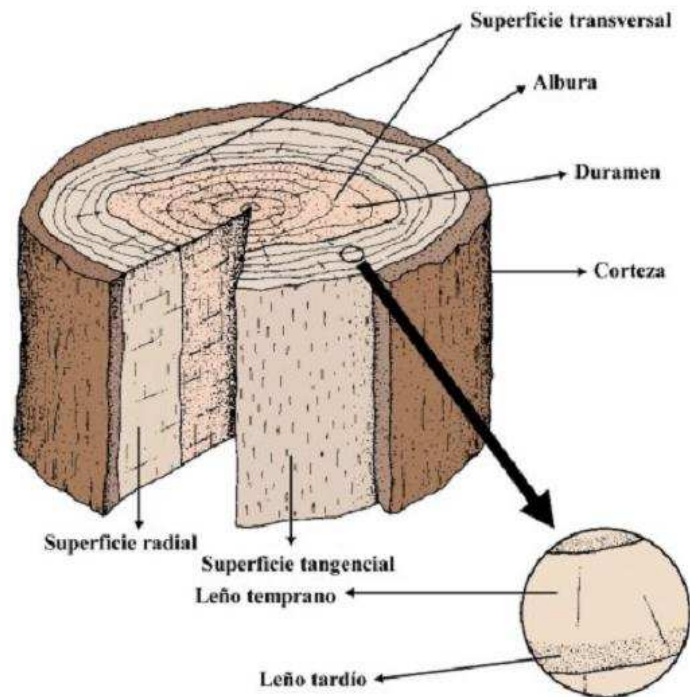


Figura 2. 1 Estructura de la madera

- **Corteza es la cubierta protectora exterior** y está conformada por tejidos muertos; sirve, además de proteger al árbol de agentes externos de daño, para evitar la evaporación del agua del tronco.
- **El cambium** es el tejido generatriz ubicado entre la corteza interna y el sásmago, produce la corteza hacia afuera y la madera hacia adentro. Si se daña al cámbium, la parte afectada muere.
- **El sásmago o jane**, parte viva de la madera generalmente de color claro, está situada entre el cámbium y el duramen. Su contenido de humedad es mayor que el del duramen pero, seca más rápidamente que éste.
- **El duramen o madera de corazón**, es la parte interna del tronco conformada por tejido muerto. Por lo general, esta madera es más oscura que la albura y su delimitación no siempre está bien definida.
- **La médula**, es el núcleo central de un tronco. La madera cercana a la médula tiende a secar con más defectos que el resto del leño.
- **Anillos de crecimiento**, son capas concéntricas de engrosamiento diametral, visibles en muchas especies, formadas por acción del cambium. La madera a nivel comercial, constructivo y estructural, se clasifican en dos grandes grupos: Duras y blandas.

2.1.4. EL AGUA EN LA MADERA

Cuando un árbol está recién cortado, su madera contiene gran cantidad de agua, variando el contenido según la época del año, región de procedencia y la especie.

Algunas especies livianas pueden contener hasta 300% ó 400% de contenido de humedad; otras muy pesadas llegan hasta un 50% a 60% como máximo.

El agua contenida en la madera se encuentra bajo tres formas:

- Agua Libre
- Agua de Saturación
- Agua de Constitución

AGUA LIBRE

También es llamada capilar, se encuentra en el interior de las cavidades celulares. Es el agua de más fácil extracción. Al eliminarla no se presentan modificaciones apreciables en las propiedades físicas y mecánicas del leño y se llega a un nivel de humedad de aproximadamente 30% en la madera. A este contenido de humedad se denomina **Punto o Zona de Saturación de la Fibras (PSF)**, la cantidad de agua libre que puede contener una madera está limitada por su volumen de poros.

AGUA DE SATURACIÓN

También es llamada higroscópica o fija, se encuentra en las paredes celulares. Durante el proceso de secado, cuando ésta ha perdido su agua libre por evaporación y continúa secándose, la pérdida de humedad ocurre con mayor lentitud hasta llegar a un estado de equilibrio higroscópico con la humedad relativa de la atmósfera que la rodea.

El equilibrio higroscópico, dependiendo del lugar está entre el 12 y 18% del contenido de humedad.

AGUA DE CONSTITUCIÓN

Es el agua que forma parte de la materia celular de la madera y que no puede ser eliminada utilizando las técnicas normales de secado. Su separación implicaría la destrucción parcial de la madera².

2.1.5. CONTENIDO DE HUMEDAD EN LA MADERA

Humedad de la madera, es la relación que existe entre la masa de agua que se encuentra en la madera, y la masa de la madera absolutamente seca, expresada en porcentaje³.

$$CH = 100 \left[\frac{m_{\text{agua}}}{m_o} \right] \quad \text{Ec. 2.1}$$

$$CH = 100 \left[\frac{m_h - m_o}{m_o} \right]$$

CH	%	Contenido de Humedad en la madera
m_h	Kg	Masa de la madera húmeda
m_o	Kg	Masa de la madera anhidra (0% de humedad)

En algunos casos de la industria de la pulpa, el contenido de humedad se calcula en función del peso húmedo o peso inicial, es decir:

$$CH_p = 100 \left[\frac{m_h - m_o}{m_h} \right] \quad \text{Ec. 2.2}$$

Por consiguiente entre CH y CH_p existe la siguiente relación:

² Manual del Grupo Andino para el secado de maderas, Junta del Acuerdo de Cartagena, Primera edición. Lima. Pp. 1-8,1-9.Copyrigh. 1989



³ Manual del Grupo Andino para el secado de maderas, Junta del Acuerdo de Cartagena, Primera edición. Lima. Pp. 1-15.Copyrigh. 1989

$$CH = \frac{100 CH_p}{100 - CH_p} \quad \text{Ec. 2.3}$$

2.1.6. DENSIDAD DE LA MADERA

Es la relación que existe entre la masa por unidad de volumen a un determinado contenido de humedad.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad \text{Ec. 2.4}$$

	Kg/m ³	Densidad de la madera
m	Kg	Masa de una pieza de madera a un determinado contenido de humedad
	m ³	Volumen de la pieza a igual contenido de humedad

El aumento en el contenido de humedad en la madera trae como consecuencia el incremento de su masa, en una proporción mayor que el incremento de su volumen y por lo tanto la densidad de la madera aumentará. Para efectos de comparación de la densidad entre especies, se han analizado los siguientes valores⁴

$$\text{Densidad anhidra } \rho_A = \frac{\text{Masa seca al horno}}{\text{volumen seco al horno}} \quad \text{Ec. 2.5}$$

$$\text{Densidad Normal } \rho_N = \frac{\text{Masa AL 12\% de humedad}}{\text{volumen al 12\% de humedad}} \quad \text{Ec. 2.6}$$

$$\text{Densidad en el PSF } \rho_F = \frac{\text{Masa al 30\% de humedad}}{\text{volumen al 30\% de humedad}} \quad \text{Ec. 2.7}$$

$$\text{Densidad básica } \rho_B = \frac{\text{Masa seca al horno}}{\text{volumen en estado verde}} \quad \text{Ec. 2.8}$$

La densidad anhidra cubre un rango muy amplio, que va desde 100 kg/m³ para la balsa, hasta 1400 kg/m³ para el guayacán.

⁴ Manual del Grupo Andino para el secado de maderas, Junta del Acuerdo de Cartagena, Primera edición. Lima. Pp. 1-20. Copyright. 1989

La densidad relativa podría tomarse como la relación entre la masa de la pieza de madera seca al horno y el volumen a un determinado contenido de humedad.

$$\rho_R = \frac{m_o}{v \rho_{\text{agua}}} \quad \text{Ec. 2.9}$$

ρ_R		Densidad relativa (anhidra, normal o básica)
m_o	Kg	Masa de la pieza de madera seca al horno
v	m^3	Volumen a un determinado contenido de humedad
ρ_{agua}	$=1000 \text{ kg/m}^3$	Densidad del agua en condiciones normales

La densidad real de la sustancia sólida de la madera es aproximadamente 1500 kg/m^3

2.1.7. CONTENIDO MÁXIMO DE AGUA EN LA MADERA

El máximo contenido de agua que la madera puede tener en su interior, está representada por la cantidad de agua higroscópica fija en un 30%, más la cantidad de agua libre localizada en los poros, se expresa de la siguiente forma:

$$CH_{\text{max}} = 100 \left[0.30 + \frac{1.5 - \rho_A}{1.5 \rho_A} \right] \quad \text{Ec. 2.10}$$

Mientras más densa es la madera, menor es el contenido de humedad máximo posible⁵.

2.1.8. HINCHAZÓN

Para entender lo que es la hinchazón y la contracción de la madera, se debe considerar dos aspectos fundamentales. El primero que los lúmenes de las células no modifican su tamaño cuando absorben o pierden agua libre. En cambio el volumen de una pieza si varía cuando absorba o pierda agua fija o higroscópica de la pared celular.

⁵ Manual del Grupo Andino para el secado de maderas, Junta del Acuerdo de Cartagena, Primera edición. Pp. 1-21. Lima. Copyright. 1989

Y el segundo que para todas las maderas se supone que el contenido de humedad en el punto de saturación de las fibras es constante e igual al 30%.

El volumen máximo de las piezas de madera, después de absorber agua hasta el punto de saturación de las fibras, se puede calcular con la siguiente expresión:

$$V_{max} = V_o(1 + 0.3\rho_{RA}) \quad \text{Ec. 2.11}$$

V_{max}	m^3	Volumen máximo de la pieza de la madera, después de absorber agua hasta el punto de saturación de las fibras.
V_o	m^3	Volumen de la madera seca al horno
ρ_{RA}	Adimensional	Densidad relativa anhidra

De la ecuación anterior se puede concluir que la hinchazón volumétrica máxima de la madera es directamente proporcional a la densidad relativa anhidra.

Como la madera tiene un comportamiento anisotrópico⁶, los cambios dimensionales normales de la madera son de magnitud diferentes en las direcciones tangenciales (B_T), radiales (B_R) y longitudinales (B_L). La contracción tangencial es 1,5 a 3 veces mayor que la contracción radial y la contracción longitudinal es normalmente despreciable en la madera. Para fines de cálculo, se desprecia el valor de la contracción o hinchazón longitudinal, por ser un valor muy pequeño.

⁶ Es la capacidad que tiene la madera, de expandirse y contraerse en forma desigual en sus diversas direcciones (longitudinal, radial tangencial).

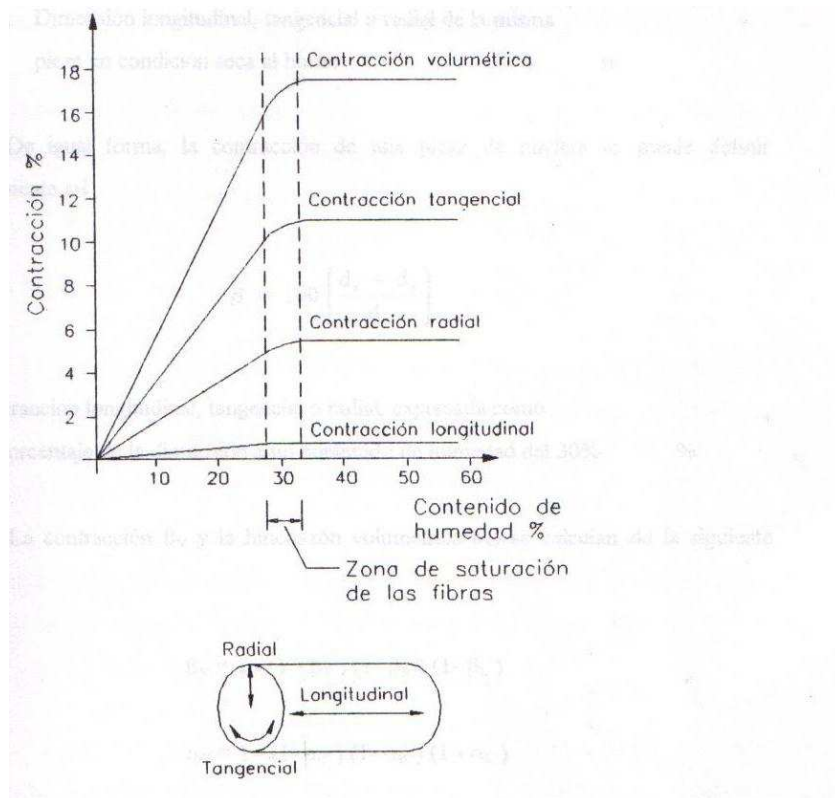


Figura 2. 2 Valores de Contracción en las Tres Dimensiones

La hinchazón lineal α de una pieza de madera se puede definir matemáticamente de la siguiente forma :

$$\alpha = 100 \left[\frac{d_f - d_o}{d_o} \right] \quad (\text{Referencia 7}) \quad \text{Ec. 2.12}$$

α = Hinchazón longitudinal, tangencial o radial expresada como % un porcentaje de la dimensión seca al horno.

d_f = Dimensión longitudinal, tangencial o radial de la pieza de la madera con un contenido de humedad igual al 30%

d_o = Dimensión longitudinal, tangencial o radial de la misma pieza en condición seca al horno.

De igual forma, la contracción de una pieza de madera se puede definir matemáticamente así:

⁷ Manual del Grupo Andino para el secado de maderas, Junta del Acuerdo de Cartagena, Primera edición. Pp. 1-30. Lima. Copyrigh. 1989

$$\beta = 100 \left[\frac{d_f - d_o}{df} \right] \quad (\text{Referencia 8}) \quad \text{Ec. 2.13}$$

β = Contracción longitudinal, tangencial o radial expresada como un porcentaje de la dimensión a un contenido de humedad del 30%

La contracción β_V y la hinchazón volumétrica α_V se calculan de la siguiente forma:

$$\beta_V = 1 - (1 - \beta_T)((1 - \beta_R)(1 - \beta_L)) \quad \text{Ec. 2.14}$$

$$\alpha_V = 1 - (1 - \alpha_T)((1 - \alpha_R)(1 - \alpha_L)) \quad \text{Ec. 2.15}$$

2.2. PARÁMETROS FUNDAMENTALES EN EL SECADO DE LA MADERA

2.2.1. TEMPERATURA

En el secado de la madera, el agua es removida de la superficie de la madera por evaporación. La velocidad de ésta depende a su vez de la cantidad de energía suministrada por unidad de tiempo y de la capacidad del medio (aire), para absorber la humedad liberada por la madera.

En un secador de madera con cámaras, el calor se transmite a la madera generalmente por convección, siendo éste el efecto predominante durante el proceso. Es importante también tener en cuenta que la temperatura, conjuntamente con la humedad relativa, son los elementos que determinan el clima dentro de una secadora.

Algunas maderas sufren decoloración cuando se secan a temperaturas mayores que 60° C, en combinación con una humedad relativa del aire mayor del 65%, debido a las reacciones químicas que se producen en la madera.

⁸ Manual del Grupo Andino para el secado de maderas, Junta del Acuerdo de Cartagena, Primera edición. Pp. 1-30. Lima. Copyrigh. 1989

2.2.2.HUMEDAD

2.2.2.1 CARACTERÍSTICAS DEL AIRE

Se denomina aire a la mezcla de gases que constituye la atmósfera terrestre, que permanecen alrededor de la Tierra por la acción de la fuerza de gravedad. El aire es esencial para la vida en el planeta, es particularmente delicado y está compuesto en proporciones ligeramente variables por sustancias tales como el nitrógeno (78%), oxígeno (21%), vapor de agua (variable entre 0-7%), ozono, dióxido de carbono, hidrógeno y algunos gases nobles como el criptón o el argón, es decir, 1% de otras sustancias⁹.

2.2.2.2 PRESIÓN PARCIAL

La presión parcial de un gas, en atmósferas, en una mezcla o solución sería aproximadamente la presión de dicho gas si se eliminaran repentinamente todos los demás componentes de la mezcla o solución y sin que hubiese variación de temperatura. La presión parcial de un gas en una mezcla es la medida de la actividad termodinámica de las moléculas de dicho gas y, por lo tanto, es proporcional a la temperatura y concentración del mismo¹⁰.

La presión parcial de un gas ideal en una mezcla es igual a la presión que ejercería en caso de ocupar él solo el mismo volumen a la misma temperatura. Esto sucede porque las moléculas de un gas ideal están tan alejadas unas de otras que no interactúan entre ellas. Hoy en día hay gases que se acercan mucho a este ideal.

Como consecuencia de esto, la presión total, es decir la suma de todas estas presiones, de una mezcla en equilibrio es igual a la suma de las presiones parciales de los gases presentes.

⁹ Diccionario enciclopédico Oceano 1 Edición 2005

¹⁰ Yunus A. Cengel. Termodinámica . Cuarta Edición. Mc Graw Hill. Pp 619

2.2.2.3 PRESIÓN DE VAPOR SATURADO

Se obtiene una presión de vapor saturado dentro de una cámara de secado, cuando el número de moléculas que se condensan, es igual número de moléculas que se evaporan de la madera, de tal manera que una disminución de temperatura en el aire provoca la condensación parcial de vapor, resultando una presión de vapor más baja, e inversamente, un aumento de temperatura conduce a una mayor evaporación de agua, y la presión de vapor aumentará. Si la temperatura permanece constante, la presión de vapor saturado, será la misma, independiente de la cantidad de aire presente.

2.2.2.4 HUMEDAD RELATIVA

La humedad relativa (HR), es un término utilizado para expresar la cantidad de humedad en una muestra dada de aire, en comparación con la cantidad de humedad que el aire tendría, estando totalmente saturado y a la misma temperatura de la muestra. La humedad relativa se expresa en porcentaje.

Se utiliza el psicrómetro instrumento que consta de dos termómetros: el seco que mide la temperatura real, y el húmedo o mojado, llamado así porque su depósito está rodeado por una muselina humedecida. Sobre la tela se evapora más o menos agua según que la humedad atmosférica sea menor o mayor respectivamente. Es decir que la evaporación será mayor cuanto menor sea la humedad relativa. El agua para evaporarse toma calor del termómetro mojado y esto hace que descienda su temperatura. Con la lectura de los dos termómetros y tablas confeccionadas a tal efecto, se deduce la humedad relativa.

Además mediante las cartas psicrométricas, podemos determinar la humedad cuando se conoce la temperatura inicial del gas (temperatura del bulbo seco) y la temperatura después de la saturación (temperatura del bulbo húmedo), corregida por presión atmosférica, con la ayuda de tablas y figuras q presentamos a continuación:

Tabla 2.1 Tabla Psicométrica a Nivel del Mar¹¹

Tabla psicrométrica										
Temperatura de un termómetro seco	Diferencia de temperatura entre los termómetros seco y húmedo (en °C)									
	(El valor de la lectura medida especifica la humedad relativa en %)									
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	100	82	64	47	31	14				
1	100	83	66	60	34	18				
2	100	84	68	52	37	22				
3	100	84	69	54	40	25	12			
4	100	85	70	56	42	28	18			
5	100	86	72	58	45	32	19	7		
6	100	86	73	60	47	35	23	11		
7	100	87	75	61	49	37	26	14		
8	100	87	75	62	51	40	29	18	7	
9	100	88	76	64	53	42	31	21	11	
10	100	88	77	65	55	44	34	24	14	5
11	100	88	77	66	56	46	36	26	17	8
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11
13	100	89	79	69	59	49	40	31	23	14
14	100	90	79	70	60	51	42	33	25	17
15	100	90	80	71	61	53	44	36	27	20
16	100	90	81	71	62	54	46	37	30	22
17	100	90	81	72	63	56	47	39	32	24
18	100	91	82	73	65	56	49	41	34	27
19	100	91	82	74	65	58	50	43	36	29
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	31
21	100	91	83	75	67	60	52	45	39	32
22	100	92	83	75	68	61	54	47	40	34
23	100	92	84	76	69	62	55	48	42	36
24	100	92	84	77	70	63	56	49	43	37
25	100	92	85	77	70	63	57	51	44	39
26	100	92	85	78	71	64	58	51	45	40
27	100	93	85	78	71	65	59	53	47	41
28	100	93	86	79	72	65	59	53	48	42
29	100	93	86	79	72	66	60	54	49	43
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44

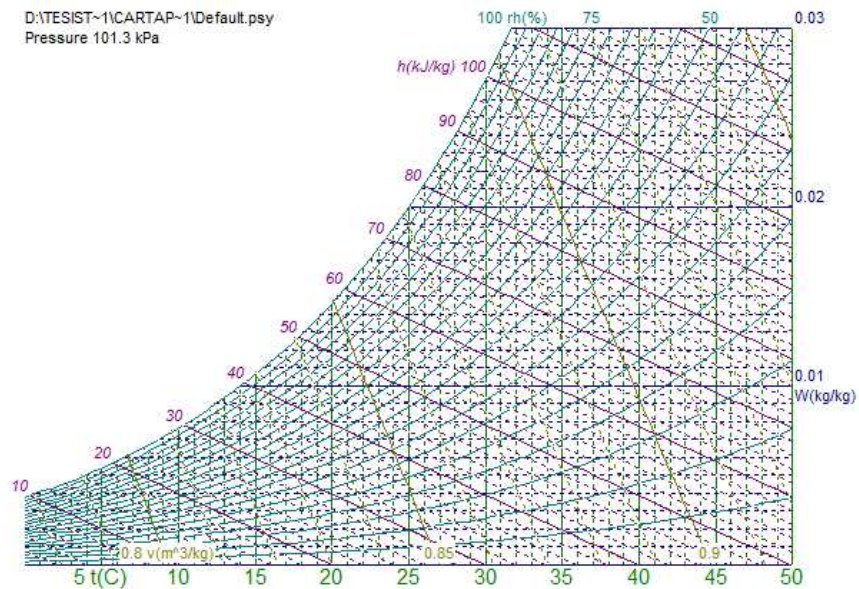


Figura 2. 3 Carta Psicométrica a nivel del Mar¹²

¹¹ Manual del Grupo Andino para el secado de maderas, Junta del Acuerdo de Cartagena, Primera edición. Lima. Pp. 2-26. Copyrigh. 1989

¹² Akton Associates Inc., 835 Arnold Dr. Suite 104, Martinez CA 94553 www.aktonassoc.com

2.2.2.5 RELACIÓN ENTRE LA HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE Y LA HUMEDAD DE LA MADERA

En una cámara de secado, con temperatura constante, la humedad relativa del aire influye o afecta directamente a la humedad de la madera, es decir si la humedad relativa del aire aumenta, entonces aumenta la humedad de la madera, e inversamente, si la humedad de la madera disminuye, la humedad relativa del aire también disminuye.

Para acelerar el secado de la madera existen las siguientes posibilidades:

- Disminuir la humedad relativa del aire, manteniendo constante la temperatura.
- Aumentar la temperatura, manteniendo constante la humedad relativa del aire, situación que es muy difícil de obtener en la práctica
- Combinar los dos procesos anteriores. Este es el método más utilizado para secar la madera

2.2.3. VELOCIDAD DEL AIRE

La circulación del aire es otro de los elementos que actúa sobre la velocidad de evaporación del agua durante el proceso de secado de la madera. La circulación de aire fresco a través de una pila de madera y la expulsión de la humedad son condiciones necesarias para asegurar la remoción del exceso de humedad dentro de un secadero y así mantener las condiciones de humedad relativa deseadas.

La velocidad del aire dentro de una pila tiene dos funciones principales. La primera es transmitir la energía requerida para calentar el agua contenida en la madera facilitando así su evaporación y segunda función es transportar la humedad saliente de la madera.

En la figura 2.4 encontramos la capa límite que siempre existe entre la madera y el aire juega un papel importante en el secado de la madera. Cuanto

menor sea el espesor de esta capa límite, más rápida será la remoción de la humedad de la superficie de la madera. La forma de la corriente del aire es importante para la velocidad del secado. Una corriente turbulenta es mucho más eficaz que una corriente laminar, pues la primera afecta en mayor forma la capa límite entre la madera y el aire.

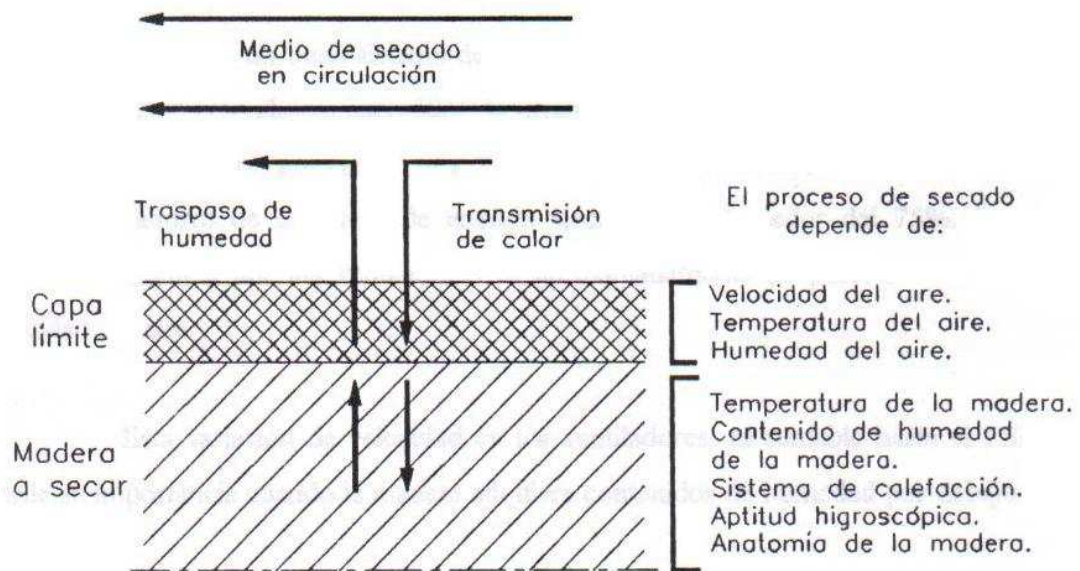


Figura 2. 4 Secado convencional de la madera aserrada¹³

La velocidad del aire desempeña un papel muy importante durante las primeras etapas del secado, sea natural o artificial, sobre todo cuando la madera está muy húmeda

A mayor velocidad del aire, mayor será la tasa de evaporación y menor el tiempo de secado y viceversa, si la velocidad del aire disminuye, la tasa de evaporación disminuye y se aumenta el tiempo de secado. Por tal razón, para asegurar un secado rápido y uniforme es indispensable una circulación del aire fuerte y regular.

Experimentalmente se ha demostrado que se obtienen condiciones óptimas de secado en la mayor parte de los casos, cuando el aire circula en una pila a una

¹³ Manual del Grupo Andino para el secado de maderas, Junta del Acuerdo de Cartagena, Primera edición. Pp. 2-22. Lima. Copyright. 1989

velocidad relativamente alta. Actualmente se trabaja con velocidades de aire a través de la estiba de alrededor de 5 m/s para maderas de secado rápido. Para maderas de mayor densidad y secado lento se recomiendan velocidades de 2 m/s. Si se utilizan velocidades mayores sin un debido control puede comprometerse la calidad de la madera por cuanto se acelera considerablemente la tasa de evaporación del agua, generándose un gradiente de humedad muy alto entre la superficie de la madera y su parte interna¹⁴.

Sin embargo podemos decir que las ventajas de velocidades altas del aire dentro de un secadero disminuyen considerablemente cuanto mayor sea el espesor de las piezas de madera, cuanto menor sea el contenido de humedad inicial, cuanto menor sea la temperatura inicial y cuanto mayor sea la densidad de la madera.

Una vez bajado el contenido de humedad por debajo del punto de saturación de las fibras se puede reducir la velocidad del aire considerablemente, sobre todo para maderas duras y de difícil comportamiento en el secado. En el caso ideal se debe variar la velocidad de giro de los motores durante el proceso de secado, tomando en cuenta el comportamiento específico de la madera a secar (especie, espesor, contenido de humedad) y la tarifa diferencial de corriente eléctrica según las horas del día (tarifa baja nocturna y tarifas altas durante las horas de mayor demanda).

Una reducción en la velocidad de giro al 50% de la nominal significará una reducción en el consumo de energía eléctrica del 75%.

2.2.4. CONTENIDO DE HUMEDAD DE EQUILIBRIO O HUMEDAD HIGROSCÓPICA DE LA MADERA

La madera es un material higroscópico y esto es porque tiene la capacidad de ceder o absorber humedad del ambiente. Dependiendo de los valores de

¹⁴ Manual del Grupo Andino para el secado de maderas, Junta del Acuerdo de Cartagena, Primera edición. Pp. 2-23. Lima. Copyrigh. 1989

humedad relativa del aire y temperatura, la madera intercambia contenido de humedad con el ambiente hasta encontrar un estado de equilibrio higroscópico.

El equilibrio higroscópico, es el equilibrio entre las presiones parciales del vapor del aire del ambiente y del producto húmedo, de tal forma que no existe transferencia de humedad del ambiente a la madera, ni de la madera al ambiente.

Es importante anotar que el equilibrio no se alcanza instantáneamente, y el tiempo de secado empleado depende de varios factores, tales como: la densidad de la madera, el espesor, tipo de madera, humedad inicial, etc.

Los valores de la humedad de equilibrio de la madera se han determinado en función de las características del aire que la rodea. A presión atmosférica constante se puede hacer variar los parámetros de humedad relativa, temperatura del aire y encontrar dichos valores en la figura 2.5.

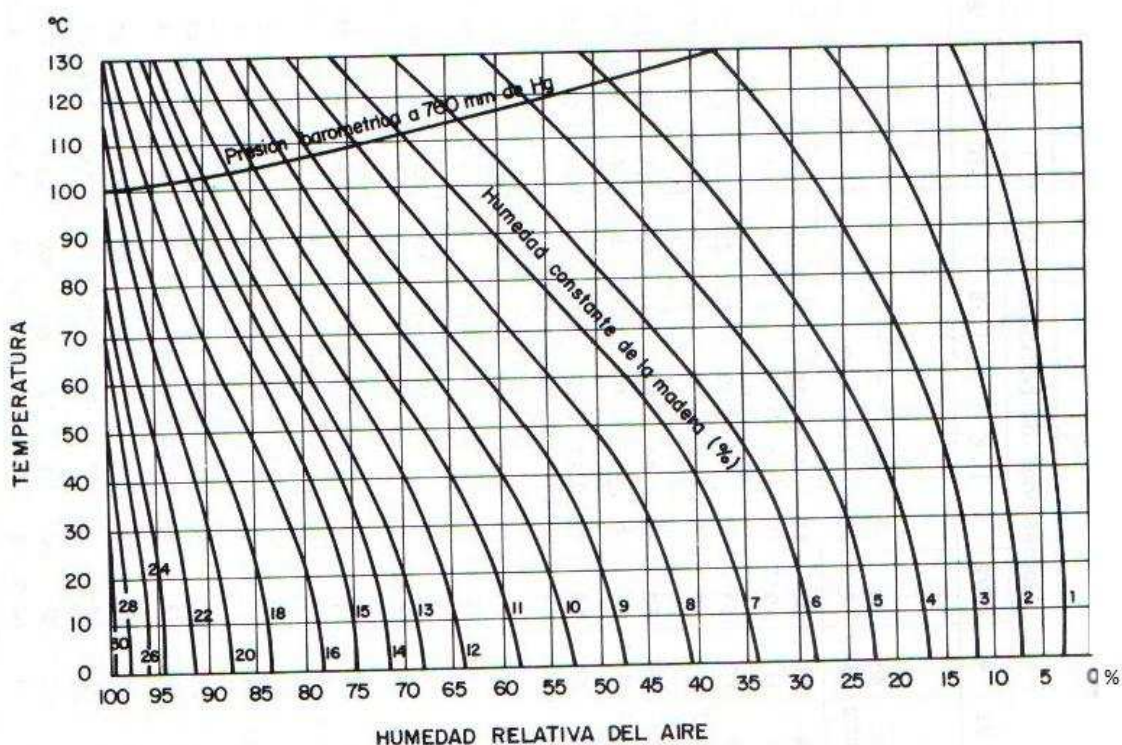


Figura 2. 5 Curva de humedad de equilibrio para madera¹⁵

¹⁵ Manual del Grupo Andino para el secado de maderas, Junta del Acuerdo de Cartagena, Primera edición. Lima. Pp. 2-27. Copyright. 1989

También para determinar el contenido de humedad de equilibrio se utilizan tablas que abarcan un rango de temperatura del aire entre los puntos de congelación y ebullición, con una desviación máxima promedio de $\pm 2\%$ las cuales presentan promedios para los datos de absorción y desorción¹⁶ representativos de varias maderas.

Tabla 2.2 Humedad relativa y contenido de humedad para diferentes temperaturas de bulbo seco y depresiones de bulbo húmedo¹⁷.

TEMP. B.S. CQ	DEPRESIONES DE BULBO HÚMEDO (°C)																					
	1	1.5	2	2,5	3	3.5	4	4.5	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	22	25	28
5	HR	86	79	72	65	58	52	45	39	33	20	7	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	ECH	19	16	14	12	11	9.5	8.5	7.5	6.5	4.5	1.5	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
13	HR	90	85	80	75	71	66	61	57	53	44	36	27	20	13	.	.	.	.	.	.	.
	ECH	20,5	18	16	14,3	13	12	11	10,5	10	8	7	6	4.5	3
25	HR	92	88	84	81	77	74	70	67	63	57	50	44	39	33	22	10	.	.	.	.	.
	ECH	21,3	19,5	17,5	16	15	14	13	12	11,5	10	9	8	7,5	6,5	5	2.3
15	HR	94	90	87	84	81	78	75	72	69	64	59	54	49	44	36	28	20	13	7	.	.
	ECH	22	19,5	18	16,5	15,5	14,5	13,5	13	12	11	10	9,5	8,5	8	6,5	6	4	3	1,5	.	.
40	HR	94	91	88	85	82	80	77	74	72	67	62	57	53	48	40	33	26	20	14	6	.
	ECH	22	19,5	11	17	16	15	14	13	12,5	11,5	10,5	9,5	9	8	7	6	5	4	3	1,5	.
43	HR	94	91	88	85	83	80	78	73	73	69	64	60	56	52	44	37	30	25	19	14	.
	ECH	22	19,5	11	17	15,5	15	14	13,5	12,5	11,3	10,5	10	9	8	7	6,3	5,5	4,5	4	3	.
50	HR	95	92	89	86	83	81	79	76	74	70	65	61	58	54	46	40	34	29	24	18	12
	ECH	22	19,5	18	16,5	15,5	15	14	13,5	12,5	11,5	10,5	10	9	8,5	7,5	6,5	5,5	5	4	3,5	2,5	1
55	HR	95	92	90	87	84	82	80	78	76	72	67	63	60	56	50	43	37	32	27	22	16
	ECH	21,5	19,5	18	16,5	15,5	14,5	13,5	13	12,5	11,3	10,5	10	9	8,5	7,5	6,3	6	5	4,5	4	3	2
60	HR	95	92	90	88	85	83	81	79	77	73	69	65	61	58	52	45	40	35	30	25	20
	ECH	21,5	19	17,5	16,5	15,5	14,5	13,5	13	12,5	11,5	10,5	10	9	8,5	7,5	7	6	5,5	4,5	4	3,5	2,5
65	HR	95	93	91	88	86	84	82	80	78	74	70	66	63	60	53	47	42	37	32	28	22
	ECH	21	18,5	17	16	15	14	13,5	13	12,5	11,5	10,3	10	9	8,5	7,5	7	6	5,5	5	4	3,5	3
70	HR	96	93	91	88	86	84	83	81	79	75	71	68	65	61	55	50	44	40	35	31	25
	ECH	20,5	21,5	17	15,5	15	14	13,5	13	12	11	10,5	9,5	9	8,5	7,5	7	6	5,5	5	4,5	3,5	3
75	HR	96	93	91	89	87	85	83	82	80	76	72	69	66	63	57	51	46	41	38	33	28
	ECH	20	18	16,5	15,5	14,5	14	13	12,5	12	11	10	9,5	9	8,5	7,3	6,5	6	5,5	5	4,5	3,5	3
80	HR	97	93	91	89	87	86	84	82	81	77	74	70	67	64	39	53	48	43	40	36	30
	ECH	19,5	17,5	16	15	14,5	13,5	13	12,5	12	11	10	9,5	1,5	8	7,3	6,5	6	5,5	5	4,5	4	3,5
85	HR	97	93	91	90	88	86	84	82	81	78	74	71	68	65	60	34	49	45	41	38	32
	ECH	19,5	17	16	15	14	13,5	12,5	12	11,4	10,3	10	9	8,5	8	7	6,5	6	5,5	5	4,5	4	3,5

¹⁶ Cuando la madera se está secando.

¹⁷ Manual del Grupo Andino para el secado de maderas, Junta del Acuerdo de Cartagena, Primera edición. Lima. Pp. 2-27. Copyright. 1989

En la tabla mostrada los valores de humedad relativa aparecen en las líneas superiores; el equilibrio de contenido de humedad aparece en las líneas inferiores.

2.2.4.1. FENÓMENO DE HISTÉRESIS

El contenido de humedad de equilibrio también depende de si la madera se está secando (desorción) o está absorbiendo humedad. En la figura 2.6 observamos que en la desorción el contenido de humedad de equilibrio es más alto que en la absorción. En los puntos terminales, es decir para madera anhidra (contenido de humedad 0%) y en el punto de saturación de las fibras (contenido de humedad 30%), los valores de equilibrio se unen y dentro de este rango las curvas de absorción y desorción forman un hojal¹⁸. para la mayoría de las maderas.

Esta diferencia de curvas de equilibrio higroscópico entre desorción y absorción se denomina histéresis, y se ilustra en la siguiente figura 2.6.

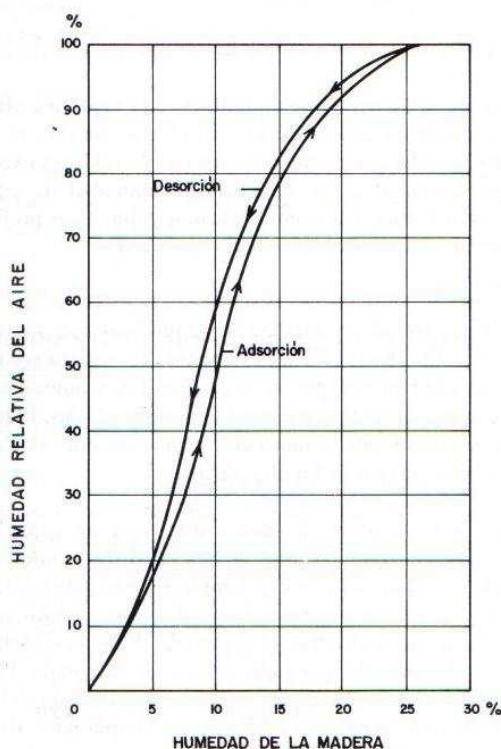


Figura 2. 6 Curva de Histéresis para absorción y desorción de humedad de la madera¹⁹

¹⁸ P. JOLY y F. M. CHEVALIER. 1980

¹⁹ Manual del Grupo Andino para el secado de maderas, Junta del Acuerdo de Cartagena, Primera edición. Lima. Pp. 2-29. Copyrigh. 1989

2.2.4.2. IMPORTANCIA DE LA HUMEDAD DE EQUILIBRIO

Para el secado artificial de la madera, es necesario e importante conocer la humedad de equilibrio de la madera, ya que durante el proceso de secado se puede establecer en cualquier instante la relación existente entre el contenido de humedad de la madera y su humedad de equilibrio (aquella hacia la cual tiende en condiciones climáticas prefijadas), Esta relación se denomina gradiente o pendiente de secado.

Además debemos conocer el contenido de humedad requerido de la madera de acuerdo a los diferentes usos. En la siguiente figura se observa valores de contenidos de humedad para las diferentes especies:

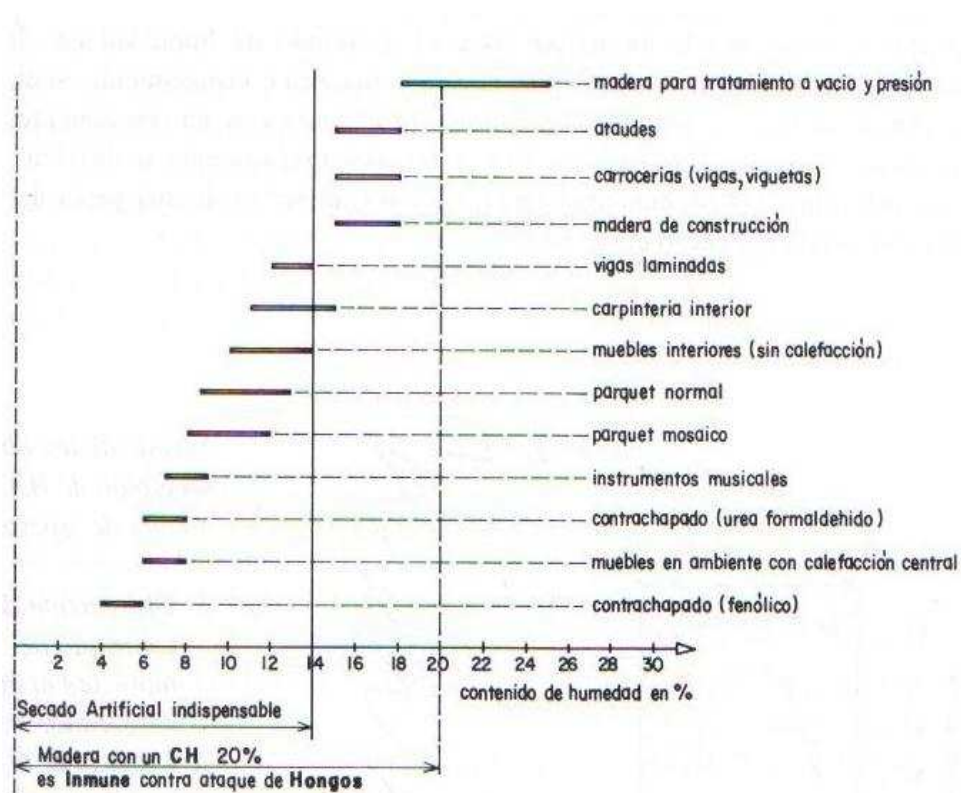


Figura 2. 7 Contenido de humedad de la madera destinada a distintos usos²⁰

²⁰ Manual del Grupo Andino para el secado de maderas, Junta del Acuerdo de Cartagena, Primera edición. Lima. Pp. 2-31. Copyright. 1989

2.2.5. GRADIENTE DE HUMEDAD DE LA MADERA

El gradiente de humedad de la madera nos indica la diferencia entre el contenido de humedad en el centro y en la superficie. Solamente en madera recién aserrada se encuentran una distribución más o menos uniforme del contenido de humedad a través de la sección transversal de una pieza esto se puede apreciar en la Figura 2.8, con el contenido de humedad al 90 %.

Tan pronto se inicia el secado, sea natural o artificial, la distribución del contenido de humedad en el interior de la pieza se modifica. En forma simple, puede explicarse el secado de la madera como el resultado del movimiento de la humedad desde el interior hasta la superficie, donde se evapora y escapa a la atmósfera circundante.

Al colocar una pieza de madera húmeda en contacto con un ambiente seco, las diferencias entre las presiones parciales de vapor de la atmósfera y del agua contenida en la madera da lugar a la evaporación del agua presente en las capas superficiales, mientras que las capas internas permanecen aún húmedas. La figura 2.8 detalla la diferencia que se establece entre el contenido de humedad de la madera en el centro y en la superficie, denominada gradiente de humedad, da origen a la circulación interna del agua del centro de la periferia y es la causa del secado.

Mientras más elevado sea el gradiente de humedad, es decir, mientras mayor sea la diferencia entre el contenido de humedad en el centro y en la superficie, más rápido secará la madera e inversamente, si el gradiente es bajo, el tiempo de secado se prolongará con un consecuente aumento de costos.

El gradiente de humedad de la madera es un parámetro de mucha importancia en el secado de madera, durante el proceso de secado, es de gran importancia establecer un gradiente de humedad óptimo que reduzca el tiempo de secado a un mínimo sin correr el riesgo de ocasionar daños en la madera.

Si se aplica un gradiente de humedad muy alto, puede ocurrir que las partes externas de la pieza de madera, al alcanzar rápidamente un contenido de humedad por debajo del punto de saturación de las fibras, empiecen a contraerse mientras que las capas internas aún tienen mucho agua libre, generándose tensiones en la madera, que pueden ocasionar deformaciones importantes.

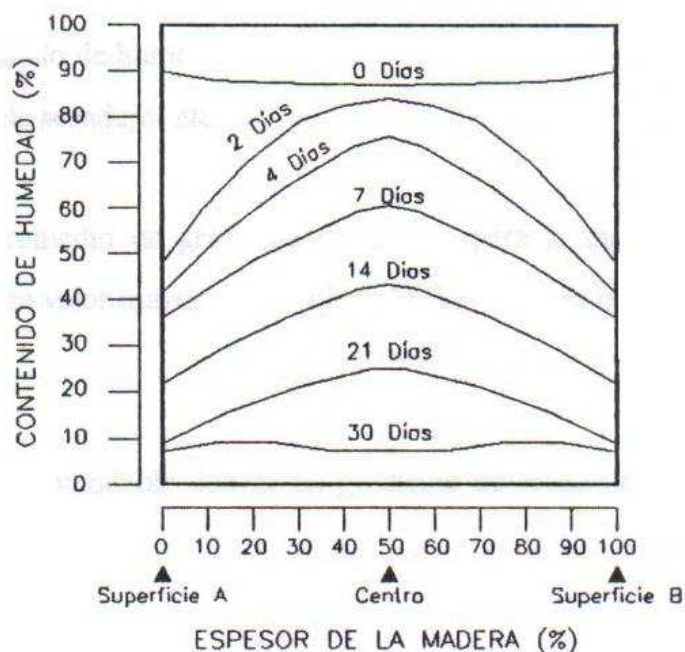


Figura 2. 8 Cambio de contenido de humedad durante el secado en relación al espesor de una tabla de madera²¹.

Un gradiente de humedad elevado, trae como consecuencia la interrupción en la circulación del agua por la formación de una capa muy seca que obstaculiza el flujo capilar de la humedad, originándose el fenómeno conocido como endurecimiento superficial que impide el secado de la madera.

Teóricamente, cuando el contenido de humedad en el centro, es igual al contenido de humedad superficial de la pieza, y este a su vez es igual al contenido de humedad dentro del secador, se dice que el movimiento de humedad de la madera ha terminado, este fenómeno se observa en la figura 2.8, cuando el contenido de humedad está al 10 %, se observa un contenido uniforme a través de la sección transversal de la pieza de madera.

²¹ Manual del Grupo Andino para el secado de maderas, Junta del Acuerdo de Cartagena, Primera edición. Lima. Pp. 2-34. Copyrigh. 1989

El gradiente de humedad, dependerá exclusivamente de las condiciones del medio ambiente.

2.2.6. GRADIENTE DE SECADO

Es una medida del potencial de secado de la madera, de éste depende la forma y progreso de secado de la madera.

Para el secado artificial, se debe tomar en consideración el contenido de humedad real (ch_{real}) y el contenido de humedad de equilibrio (ECH), la relación de estos dos valores se denomina gradiente de secado.

$$GS = \frac{CH_{real}}{ECH} \quad \text{Ec. 2.16}$$

Gradientes de secado elevados no favorecen el secado debido a la formación de grietas, tensiones internas, endurecimiento de la capa externa de la madera, por el contrario, gradientes demasiado pequeños, prolongan el secado de la madera elevando costos, lo cual no es conveniente.

Un óptimo gradiente de secado depende de: el tipo o especie de madera, especie de la madera a secar, contenido de humedad inicial, tipo de secadero, etc.

Para la mayoría de las maderas, el gradiente de secado promedio es 2, pero para especies desconocidas es recomendable usar un gradiente de secado de 1,5 a 1,6.

2.3. DESARROLLO DEL PROCESO DE SECADO

La madera puede ser secada de dos formas

- Al aire libre, y
- En hornos secadores

2.3.1. PRINCIPALES VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL SECADO AL AIRE LIBRE

La principal ventaja, es el bajo costo de la inversión inicial, mientras que su desventaja de este sistema de secado es estar sujeto a los cambios climáticos, no es posible ejercer control sobre su desarrollo. La duración depende de las características de las especies de madera, de las condiciones climáticas, de la forma de apilado y de la disposición y ubicación de la playa de secado, pero en todos los casos el proceso es relativamente lento puede variar entre 5 a 8 meses, la imposibilidad de llegar a contenidos de humedad menores a 14%, por lo tanto existirán más defectos en la madera que se está secando.

2.3.2. PRINCIPALES VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL SECADO EN HORNOS

Las ventajas que ofrece este tipo de secado, son la reducción del tiempo de proceso, en la mayoría de los casos alcanzando 5 a 30 días, además la atmósfera dentro del secador puede ser controlada, y por lo tanto habrá una menor formación de defectos en la madera. Otra ventaja de este tipo de secado es la de poder alcanzar contenidos de humedad, tan bajos como sean requeridos de acuerdo con el uso final de la madera.

La principal desventaja de este tipo de secado es su inversión inicial.

Para empresas que se dedican al secado artificial, es recomendable realizar un presecado de la madera, mediante el uso de sistemas de apilado cubierto y una distribución adecuada de las pilas dentro de un patio, antes de ingresar la madera al horno. Con este procedimiento se disminuyen substancialmente los costos del secado artificial.

El secado de la madera es un proceso bastante costoso en energía. El equipo normalmente implica una inversión importante. Y el tiempo de secado, de

estacionamiento y la degradación por secado de la madera, también se carga al costo de producción.

El secador industrial de la figura 2.9 es un secador automatizado que se construye en recintos cerrados permitiendo así mantener en todo momento las condiciones ideales dentro de la cámara de secado y del sistema de calentamiento y humidificación del aire. A demás cuenta con sensores de temperatura y humedad del aire de la cámara. La energía calórica necesaria se la obtiene mediante la combustión de algún combustible. El flujo de aire caliente dentro del secador se consigue con la ayuda de ventiladores instalados dentro de la cámara de secado. El vapor de agua necesario para aumentar la humedad relativa del ambiente se lo obtiene de una caldera, o utilizando agua pulverizada.

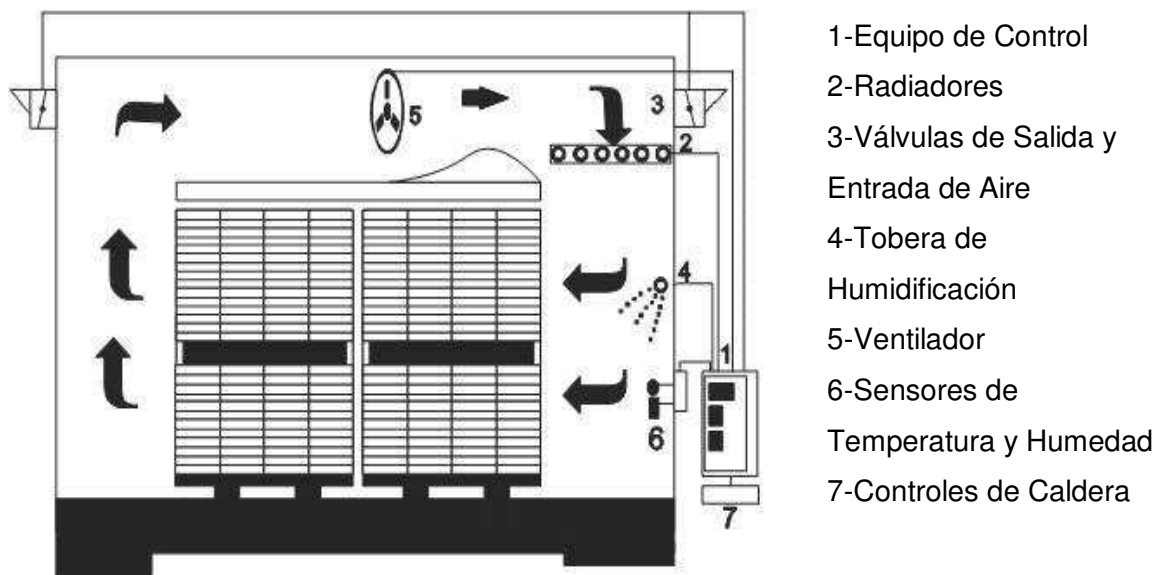


Figura 2. 9 Elementos de un secador industrial

Los costos del secado artificial en hornos son al principio mucho más elevados que los del secado al aire libre, por la gran inversión de dinero en equipos, construcciones civiles, combustibles, instalaciones eléctricas y supervisión. Sin embargo la rapidez de secado entre 10 y 40 veces más rápido que el aire libre y la calidad final de la madera, compensan la inversión.

El secado artificial en hornos se lo realiza a temperaturas que van desde los 45 a 90°C. Para calentar éstas cámaras se puede utilizar diferentes fuentes

térmicas, como el vapor de agua, el agua caliente, quemadores a base de combustibles líquidos, energía eléctrica y desperdicios sólidos.

El secado se lo realiza siguiendo programas previamente establecidos, con ambientes cada vez más cálidos y secos, al mismo tiempo que se realiza el control de la temperatura, humedad relativa del ambiente y humedad presente en la madera.

2.3.2.1. MOVIMIENTO MIGRATORIO DEL AGUA EN EL SECADO

El movimiento migratorio del agua en la madera se da desde zonas que tienen un alto contenido de humedad a zonas que poseen bajo contenido de humedad, con la finalidad de alcanzar un equilibrio de humedad en toda la pieza de madera.

Por encima del punto de saturación de las fibras, el movimiento del agua libre líquida es causado por fuerzas capilares, durante su evaporación no se producen tensiones dentro de la madera y solo se modifica la distribución del contenido de humedad hacia el interior de la pieza.

Por debajo del punto de saturación de las fibras, la remoción del agua se realiza por difusión a través de las paredes celulares.

2.3.2.2. MOVIMIENTO CAPILAR DEL AGUA EN LA MADERA

El movimiento del agua libre en las cavidades celulares, es similar al transporte de agua a través de una cañería, en que el agua que brota por un extremo es continuamente reemplazado por el agua proveniente del interior. El movimiento capilar es debido a diferencias de presión y depende del tamaño de los capilares, o sea del tamaño del lumen y de las punteaduras de las células.

Como se observa en la parte a de la figura 2.10, la tensión superficial en la interface agua-aire, origina una fuerza hacia arriba sobre la superficie del agua, ésta a su vez ejerce una tensión capilar igual, pero en dirección contraria sobre la

superficie de separación, esta tensión del agua ejerce una presión interior, tanto sobre las paredes del tubo capilar como sobre la superficie de la interface. El efecto de la gravedad no se considera porque es despreciable con respecto a las fuerzas capilares producidas en el proceso de secado.

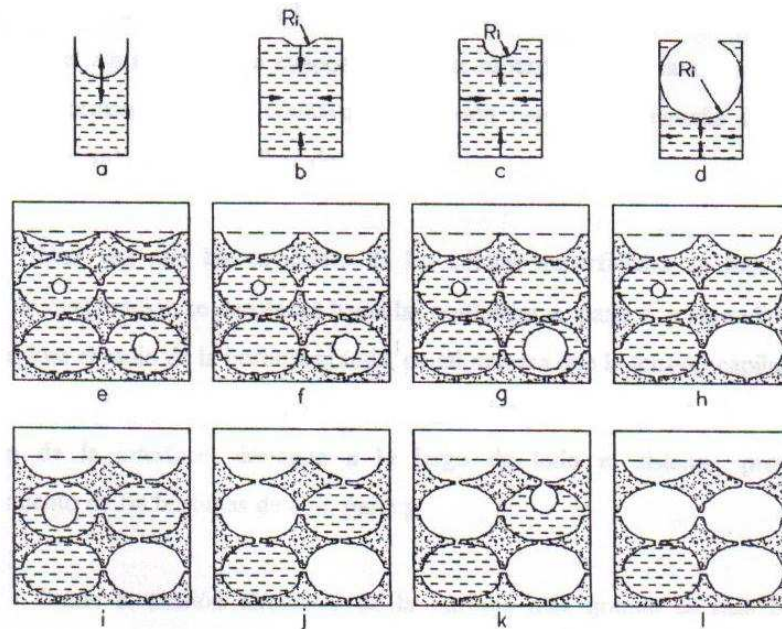


Figura 2. 10 Evaporación del agua libre de la madera²²

La parte b de la figura 2.10, indica una superficie capilar a través de la cual el agua líquida se evapora al aire. En este instante, el radio de curvatura R_i de la superficie es grande y por lo tanto la tensión capilar es pequeña. Como la evaporación continúa, el radio de curvatura va disminuyendo hasta que se hace igual al radio del orificio o cavidad de evaporación, parte c de la figura 2.10, al tiempo que la tensión capilar va aumentando. Al seguir la evaporación se tiene como resultado un aumento en el radio capilar y en consecuencia una disminución de la tensión capilar, parte d de la figura 2.10.

De acuerdo a lo anterior, se concluye que la máxima tensión capilar se presenta cuando el radio de la superficie de evaporación se hace igual al del orificio o cavidad.

²² Manual del Grupo Andino para el secado de maderas, Junta del Acuerdo de Cartagena, Primera edición. Lima. Pp. 2-37. Copyright. 1989

Para comprender mejor el movimiento del agua libre en la madera, suponemos que al iniciarse el secado, las cavidades celulares están saturadas de agua, excepto dos de ellas que contienen burbujas de aire de diferente tamaño, parte e de la figura 2.10.

El secado se inicia en la superficie exterior de la madera que está expuesta al aire. Cuando el agua empieza a evaporarse, en la superficie de separación de la interface aire-agua se forman meniscos cóncavos, la tensión capilar es pequeña debido al radio relativamente grande de la superficie de secado.

Una vez que las cavidades de las células superficiales se han vaciado, los meniscos de evaporación se desplazan hacia las punteaduras, parte f de la figura 2.10, y los radios se reducen aproximándose al radio de la burbuja grande, de tal manera que la tensión capilar del sistema celular aumenta. Esta tensión actúa sobre las paredes celulares y sobre los meniscos de separación de la interface aire-agua a lo largo de todo el sistema, provocando un ensanchamiento de las burbujas de aire, parte g de la figura 2.10.

Como la tensión alrededor de la burbuja más grande es más baja, ésta se expande progresivamente hasta que ocupa toda la cavidad celular, es decir hasta que toda el agua es removida por evaporación, parte h de la figura 2.10. El agua evaporada de esta cavidad celular, se traslada principalmente a través de la célula adyacente en dirección de la superficie de evaporación.

Por lo indicado anteriormente, es posible que una célula localizada más hacia el interior de una pieza de madera, pierda su agua capilar antes que una que esté más cerca a la superficie. Esta situación puede explicar la aparición de bolsas húmedas en la madera al terminar el secado.

Luego de que la burbuja grande se ha ensanchado hasta cubrir todo la cavidad de la célula, las curvaturas de los meniscos se reducen de nuevo cuando éstos regresan a las punteaduras, entonces otra vez la tensión capilar del sistema aumenta progresivamente hasta hacerse lo suficientemente grande para que

pueda provocar el ensanchamiento de la burbuja más pequeña, parte i de la figura 2.10 y hacer que el agua desplazada emigre a través de la pared celular vecina y de las punteaduras para finalmente, evaporarse en la superficie, parte j de la figura 2.10.

Al continuar la evaporación, los meniscos regresan a las punteaduras y la tensión en el agua capilar es mayor que antes, ya que no existen burbujas de aire cerca que contrarresten la tensión por ensanchamiento.

La tensión máxima ejercida sobre las paredes celulares está determinada por el tamaño de las punteaduras más grandes en el sistema celular. La mayoría de las maderas pueden resistir esta tensión capilar máxima.

Cuando la superficie de evaporación llega a una célula llena, se expande al interior de la célula, parte k de la figura 2.10, dando como resultado un incremento gradual del radio de curvatura, acompañado por una disminución de la tensión capilar. El agua se evapora en el espacio de aire que hay en la cavidad celular y luego se traslada a la superficie de la madera en forma de vapor, parte

2.3.2.3. DIFUSIÓN DEL AGUA EN LA MADERA

Es un fenómeno provocado por la acción simultánea de los gradientes de presión de vapor en las cavidades celulares y de los gradientes de humedad en las paredes celulares. A través de las paredes celulares, una molécula de agua se desplaza debido al gradiente de humedad existente; a través de las cavidades celulares y sus aberturas, el desplazamiento se realiza en función del gradiente de presión de vapor. Este movimiento se realiza desde las zonas húmedas hacia las más secas hasta alcanzar la superficie de la pieza de madera.

Alrededor del punto de saturación de las fibras, el movimiento capilar pierde importancia muy rápidamente, a consecuencia del predominio del movimiento de las moléculas de agua ligada por difusión. El movimiento de agua ligada por debajo del punto de saturación de las fibras, se produce como

resultado de gradientes de contenido de humedad, entre los pequeños espacios submicroscópicos de la pared celular.

2.3.3.HORNOS DE SECADO

Las partes constitutivas de un secador de madera son:

- Cámara de secado
- Sistema de Ventilación
- Sistema de Calefacción
- Sistema de Humectación
- Sistema de Control
- Coche para apilado de madera

2.3.3.1. CÁMARA DE SECADO

La cámara de secado es el lugar físico en donde se realiza el proceso de secado. Son cámaras herméticas, hechas de materiales que entregan una buena aislación térmica, para tener el mínimo de pérdidas calóricas, además deben ser resistentes a la corrosión, ya que la madera libera ácidos durante su secado, debe ser hecha a prueba de fuego.

Para su buena construcción se deben tomar en cuenta los siguientes factores:

- Las cámaras de secado se pueden ubicar bajo galpones o al aire libre, en este caso deben soportar cargas producidas por vientos, lluvia o nieve.
- El piso de las cámaras es de hormigón y debe ser capaz de resistir el peso de las pilas de madera, además, es recomendable incorporar un aislante para evitar pérdidas de calor.
- La cámara de secado debe ser tan resistente, como para soportar la carga de madera, y los equipos sin que existan fallas estructurales.
- Utilización de puertas de fácil manejo y de cierre perfecto.

Los cimientos deben soportar el peso de las paredes y el techo de la cámara, además del peso de la madera que se va a secar. Están compuestos de zapatas de cimentación y cadenas de amarre.

Las zapatas de cimentación consisten en un ancho prisma de hormigón armado situado bajo los pilares de la estructura. Su función es transmitir al terreno las tensiones a que está sometido el resto de la estructura y anclarla²³.

Las cadenas de amarre sirven para evitar los posibles desplazamientos entre las columnas y las zapatas.

La superficie del piso debe ser lisa y uniforme, con una pendiente mínima del 1%, para lograr un correcto drenaje del agua proveniente de la madera y de sistema de humectación.

Las paredes del secador deben tener un gran aislamiento, para asegurar una eficiente utilización del calor.

Los materiales comúnmente empleados para su construcción son madera, concreto, bloques de concreto, ladrillo y materiales metálicos.

La **madera** no es muy recomendada porque tiene corta duración, no es buen aislante térmico, se destruye por acción de la humedad, y presenta un alto riesgo de incendio.

El **concreto** vaciado y los **bloques de concreto** son materiales muy buenos si se considera las condiciones de aislamiento, pero casi siempre son más costosos que los demás.

El **ladrillo** es el material más utilizado en la construcción de paredes por su bajo costo y buenas condiciones de aislamiento. Debe ser del tipo recocido, porque el ladrillo crudo se deteriora con facilidad.

²³ web: http://es.wikipedia.org/wiki/Zapata_%28cimentaci%C3%B3n%29

Si la temperatura interior de la cámara es superior a 90° C, se emplea paredes dobles, con un espacio de 5 a 10 cm entre ellas, para mejorar las condiciones de aislamiento.

La pared exterior puede quedar con el ladrillo a la vista, y la interior debe tener un acabado lo más liso posible para lograr una buena circulación del aire. De preferencia se debe recubrir con una pintura resistente a altas humedades y temperaturas.

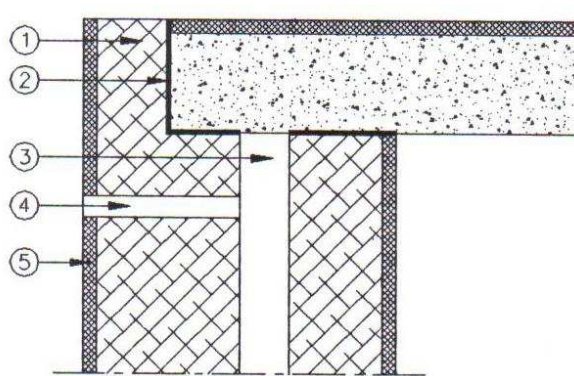


Figura 2. 11 Detalle de pared de la cámara de secado

- 1.- Pared de doble muro
- 2.- Junta de dilatación resistente a temperaturas hasta 100 ° C
- 3.- Espacio aireado
- 4.-Apertura para la circulación del aire
- 5.-Material aislante

Los secadores fabricados en metal son generalmente de aluminio puro, con aislamiento térmico de alta eficiencia, y no se recomienda la utilización de acero por el constante peligro de corrosión.

El techo del secador es construido con los mismos materiales que se utilizan para la construcción de paredes.

Cuando los ventiladores se instalan, este debe diseñarse adecuadamente para que soporte su peso y vibraciones.

Para lograr una mejor circulación del aire, se puede redondear las esquinas interiores entre el techo y las paredes laterales, y en medio de ello debe colocarse juntas de dilatación para evitar los agrietamientos ocasionados por los cambios de temperatura.

Se recomienda recubrir la parte superior del techo con un material aislante, con el objeto de evitar la condensación del vapor de agua en su superficie interior.

Dependiendo del tipo de madera, durante el secado, la pila sufre una contracción entre el 3 y 10% en promedio, por lo tanto los deflectores deben tener un ancho suficiente para cubrir este espacio.

Los pasillos laterales tienen a función de permitir una correcta circulación del aire, se extienden longitudinalmente en la cámara de secado, entre las paredes laterales y las pilas de madera.

No se tiene una tabla o fórmula que nos indique el ancho adecuado de este espacio, pero se recomienda para una pila de 3,6m de altura, un ancho de 1,4m. Este espacio también se aprovecha para colocar los dispositivos de control, el sistema de humectación y en algunos casos el intercambiador de calor.

Las **puertas** se ubican en uno o en los dos extremos del secador, como también puede estar ubicada lateralmente, dependiendo de las facilidades de carga y descarga de la madera.

Deben estar contruidos en materiales resistentes a la corrosión, y se requiere que estén bien aisladas, sean de peso ligero y que tengan fácil manejabilidad.

Las **ventilas** tienen la función de renovar el aire de la cámara y controlar la humedad relativa interior. Pueden estar ubicadas sobre el techo o en la parte superior de las paredes, pueden ser accionadas manual o automáticamente. También pueden construirse con materiales resistentes a la corrosión, como el aluminio.

2.3.3.2. SISTEMA DE VENTILACIÓN

Este sistema funciona a base de motores ubicados dentro o fuera de las cámaras, y la transmisión se la realiza con poleas o con el motor acoplado directamente al ventilador. La mayoría de estos motores resisten temperaturas de hasta 40 °C y requieren su propio mantenimiento.

Si los motores van en el interior de la cámara, se utilizan motores totalmente cerrados y recubiertos con aislamiento de protección contra altas temperaturas y elevada humedad.

Los ventiladores se pueden colocar en diferentes disposiciones, teniendo cada una de ellas ventajas y desventajas para el proceso de secado.

2.3.3.2.1. VENTILADORES COLOCADOS SOBRE LAS PILAS

Dentro de esta posibilidad, existen dos formas de colocar los ventiladores, la primera es montarla sobre un mismo eje, y desviar el aire un ángulo de 90° para que pase a través de las pilas de madera.

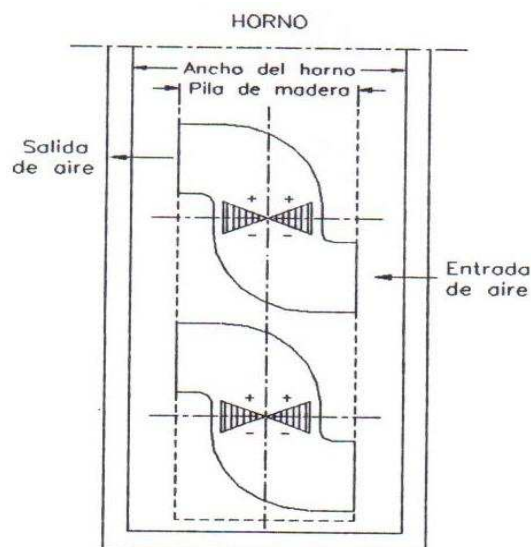


Figura 2. 12 Ventiladores colocados sobre las pilas²⁴

²⁴ Manual del Grupo Andino para el secado de maderas, Junta del Acuerdo de Cartagena, Primera edición. Lima. Pp. 3-47. Copyright. 1989

Las ventajas de los ventiladores colocados sobre un eje son:

- Se puede alcanzar velocidades de aire entre 0.7, 0.75 y 2.5 m/s.
- Con un solo motor se puede mover grandes volúmenes de aire, impulsando varios ventiladores localizados sobre el eje.

Sus principales desventajas son:

- Como el aire tiene que dar un giro de 90°, presenta irregularidades en el flujo, y existe pérdidas considerables en la circulación del aire.
- Si el eje que une a los ventiladores es largo, se descentra con facilidad, lo que genera vibraciones que afectan la estructura de la cámara.

La segunda forma, es colocar ventiladores transversales sobre la pila.

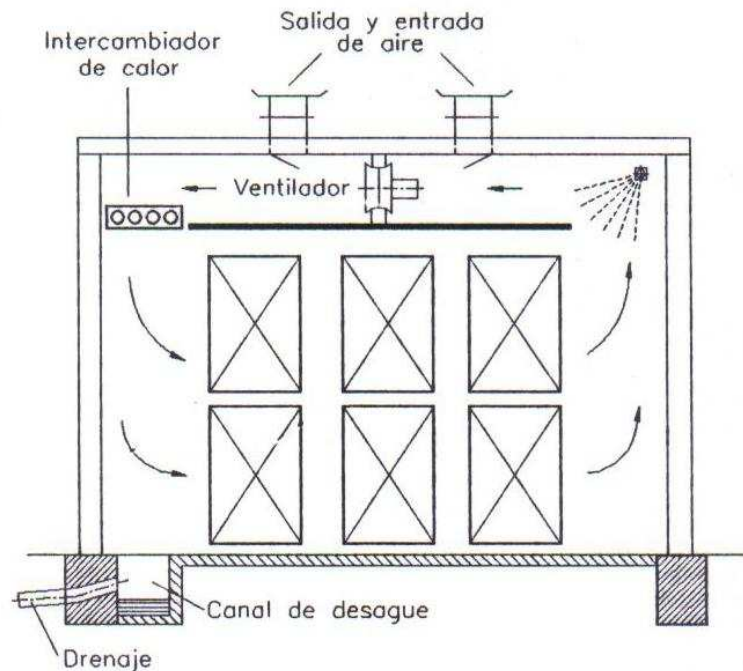


Figura 2. 13 Ventiladores colocados sobre la pila en forma transversal²⁵

Al abrir las ventilas y renovar el aire saturado (cuando ha alcanzado el 100% de humedad), quiere decir que la temperatura del aire seco es igual a la temperatura del bulbo húmedo; o cuando la diferencia de temperaturas de bulbo

²⁵ Manual del Grupo Andino para el secado de maderas, Junta del Acuerdo de Cartagena, Primera edición. Lima. Pp. 3-47 Copyrigh. 1989

seco con la temperatura de bulbo húmedo es cero, y nos podemos dar cuenta mediante las tablas psicométricas de la siguiente manera:

Tabla 2.3 Tabla Psicométrica a 100% de Humedad Relativa²⁶

Psicrometría			
Datos			
Unidades:	<input checked="" type="radio"/> SI	<input type="radio"/> Ing.	
Parámetros	Valor	Unidad	
Temperatura:	50	C	
Temp. b. húmedo:	50	C	
Humedad relativa:	100	%	
Punto de rocío	49.985286268	C	
Altitud SNM	656	m	
<input type="button" value="Calcular"/>			
Resultados			
Presión Atmosférica	0.9369357968	bar	
Pv sat	123.49824742	mbar	
Pv	123.49824742	mbar	
Humedad absoluta	0.0944336906	kg/kg	
Entalpía	295.02717093	kJ/kg	
Volumen específico	1.1390034677	m3/kg	

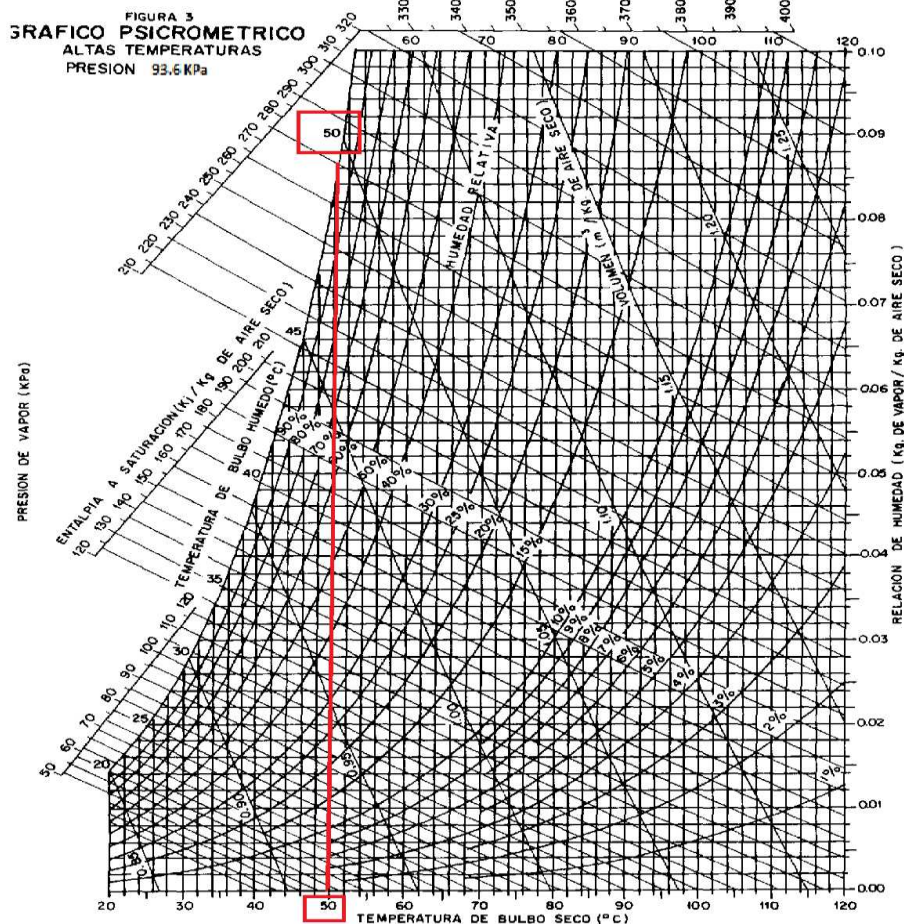


Figura 2. 14 Carta Psicométrica a 93,69 KPa (100% Humedad relativa)²⁷

²⁶ Web

http://www.freedownloadmanager.org/es/downloads/programa_de_psicometr%C3%ADa._gratis/

²⁷ Akton Associates Inc., 835 Arnold Dr. Suite 104, Martinez CA 94553 www.aktonassoc.com

Los ventiladores pueden ser axiales, de giro reversible, para conseguir una óptima distribución del flujo de aire a lo largo y ancho del secador. Dependiendo del diámetro, revoluciones y distancia entre ventiladores, se puede obtener velocidades de aire entre 1 y 7 m/s.

2.3.3.2.2. VENTILADORES COLOCADOS LATERALMENTE

Los ventiladores van colocados entre una pared lateral y la pila de la madera, casi siempre son axiales y de diámetro igual a la altura de la pila. Se sujetan desde el piso o en la pared, y no necesitan del techo falso como en el caso anterior. El aire es proyectado horizontalmente, a través de la pila de madera en dirección transversal. El retorno se hace sobre la pila a través de ella.

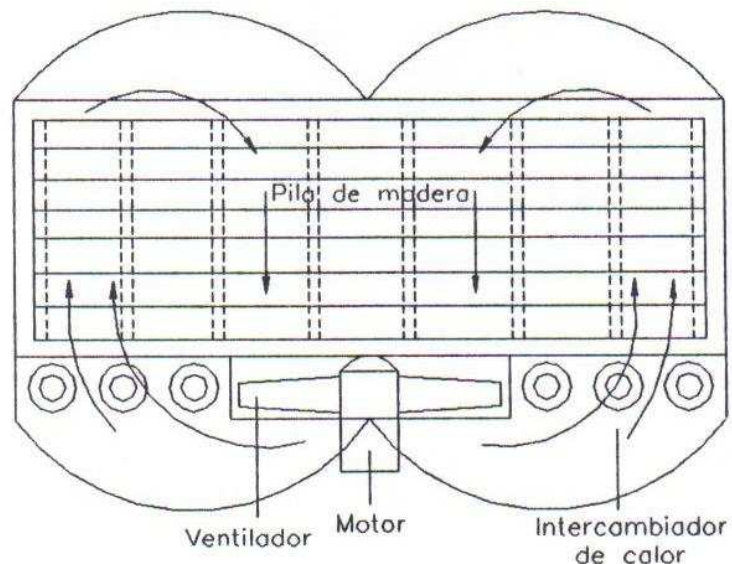


Figura 2. 15 Ventilación transversal²⁸

Dentro de estos ventiladores colocados lateralmente, existe una variación, que consiste en utilizar ventiladores de pequeño diámetro situados en el tercio lateral inferior, de tal forma que el aire entre o retorne por la parte superior de la fila.

²⁸ Manual del Grupo Andino para el secado de maderas, Junta del Acuerdo de Cartagena, Primera edición. Lima. Pp. 3-49 Copyrigh. 1989.

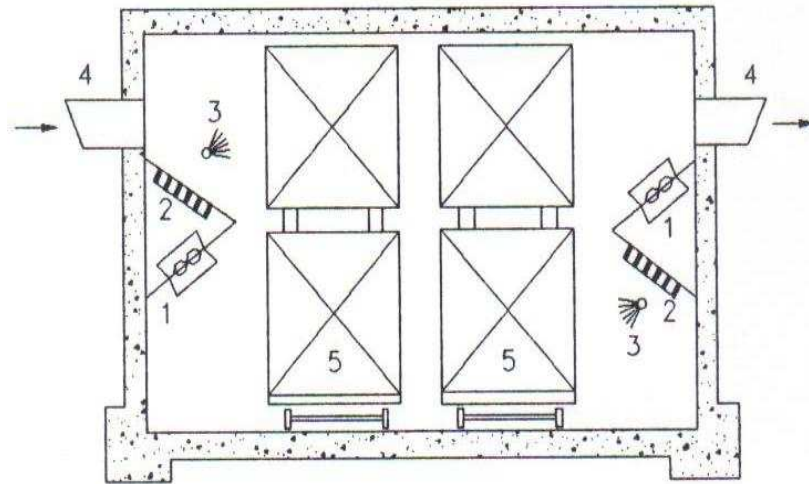


Figura 2. 16 Ventilación Lateral en ambos lados²⁹

- 1.- Ventiladores
- 2.- Intercambiador de calor
- 3.- Sistema de humectación.
- 4.-Ventilas
- 5.- Pilas de madera

Las ventajas de la ventilación lateral son:

- No necesita de un techo falso, porque los ventiladores y su motor están instalados sobre el piso o en las paredes.
- La altura de la cámara de secado se reduce considerablemente, a pesar de utilizar ventiladores de gran diámetro.
- Las deficiencias en el apilado, no afectan mucho en el flujo de aire.
- El mantenimiento y reparación son más fáciles porque los equipos tienen mayor facilidad de acceso.

Las desventajas de la ventilación lateral son:

²⁹ Manual del Grupo Andino para el secado de maderas, Junta del Acuerdo de Cartagena, Primera edición. Lima. Pp. 3-50. Copyrigh. 1989.

- Se necesita un mayor ancho de la cámara de secado, por la presencia del ventilador y del intercambiador de calor.
- El secado no es uniforme y existe una gran variación del contenido de humedad, debido a la diferencia de velocidad del aire entre un lado de la pila y el otro.
- El flujo del aire es mayor hacia la periferia que hacia el centro del ventilador, en donde la proporción va ser prácticamente nula.

2.3.3.3. SISTEMA DE CALEFACCIÓN

Las fuentes de energía que se utilizan para calentar el aire, pueden ser muchas.

Las empresas interesadas en la instalación de este tipo de secadores, deberán analizar las facilidades que les ofrezcan cada una de las alternativas expuestas a continuación, para así optar por la más conveniente.

Una de las características fundamentales de este tipo de maderas es la presencia de vasos o poros.

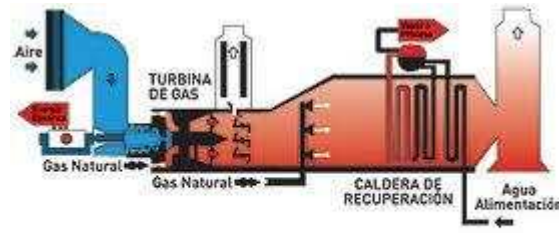
2.3.3.3.1. VAPOR A BAJA PRESIÓN. Hasta 0,1 MPa; 15 psi



Figura 2. 17 Vapor a baja presión

Esta fuente de calor, es recomendada para secar maderas latifoliadas a bajas temperaturas. Permite obtener humedades relativas altas, y es de fácil operación, pero en la cámara de secado no se puede alcanzar temperaturas mayores a 85°C, con adecuadas condiciones de aislamiento.

2.3.3.3.2. VAPOR A MEDIANA Y ALTA PRESIÓN



TURBINA DE GAS EN CICLO SIMPLE

Figura 2. 18 Vapor a mediana y alta presión

Es uno de los sistemas más apropiados para la industria del secado de la madera. Se pueden alcanzar temperaturas de 115°C con 1 MPa; 150 psi. Se necesitan líneas de vapor y válvulas más pequeñas que las requeridas a bajas temperaturas, por lo que permiten un calentamiento más rápido con un control menos complicado.

2.3.3.3.3. AGUA CALIENTE A BAJA PRESIÓN. 0,35 MPa; 50 psi



Figura 2. 19 Agua caliente a baja presión

Se pueden alcanzar hasta 85°C de temperatura dentro de las cámaras. Sus instalaciones son más costosas que las calderas a vapor de baja presión, ya que se requieren tuberías de mayor diámetro, bombas para la circulación del agua y una mayor superficie de transferencia de calor.

2.3.3.3.4. CALEFACCIÓN ELÉCTRICA



Figura 2. 20 Calefacción Eléctrica

El sistema de calefacción eléctrico puede ser directo o indirecto, pero en ambos casos resulta antieconómico, debido a los altos costos de instalación, transformadores, y de energía eléctrica en sí.

2.3.3.3.5. CALENTAMIENTO DIRECTO CON DESPERDICIOS DE MADERA

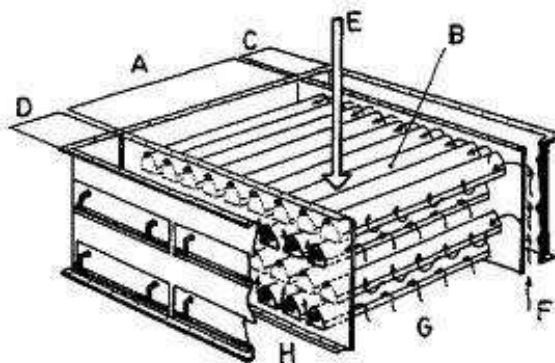


Figura 2. 21 Calentamiento directo

Este tipo de sistema no es recomendable, porque al suministrar los gases provenientes de la combustión directamente a la cámara de secado se ocasiona un alto riesgo de producir incendios.

Además este sistema no permite un control eficaz de la temperatura y de la humedad relativa del aire, ensucia la madera en forma considerable, aumenta el peligro de daños de secado, y las partículas de ceniza que se depositan en la superficie de la madera, provocan que el tiempo de secado se incremente.

2.3.3.3.6. CALENTAMIENTO A BASE DE ACEITE TÉRMICO

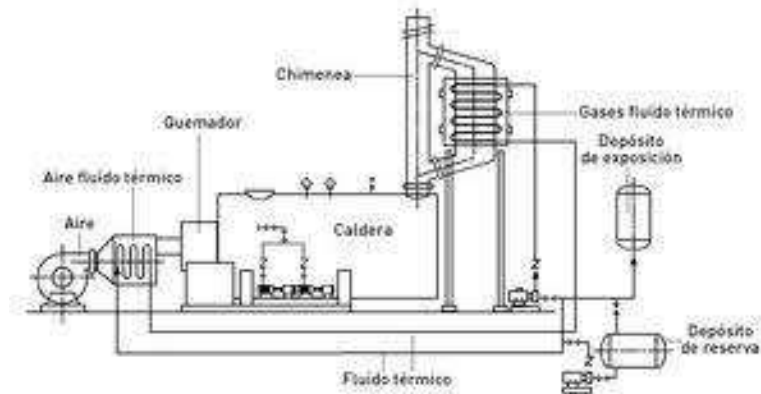


Figura 2. 22 Calefacción con Aceite térmico

La caldera es muy similar a las utilizadas en los sistemas de vapor y agua caliente. Se pueden aprovechar los desperdicios de madera como combustible. Con este sistema se alcanzan temperaturas de hasta 180°C, utilizando tubería de baja presión. Es muy ventajoso porque no es contaminante y su control puede ser totalmente automático. Tiene el inconveniente de necesitar una inversión económica elevada.

2.3.3.3.7. CALEFACCIÓN UTILIZANDO DESPERDICIOS DE MADERA

Es una de las mejores alternativas, porque el combustible (aserrín, trozos de etc.) es muy barato y está disponible en toda la industria maderera, aun cuando la inicial es relativamente alta.

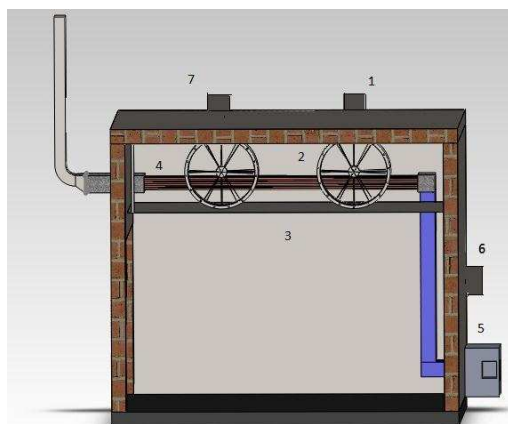


Figura 2. 23 Calefacción utilizando desperdicios de madera

2.3.3.4. SISTEMA DE HUMECTACIÓN

Consta principalmente de atomizadores colocados en el tubo perforado, con el objeto de elevar la humedad relativa en la cámara de secado. Si a través de los atomizadores, se eleva la presión, es necesario utilizar una válvula reductora y además bajar su temperatura para obtener vapor saturado, de lo contrario la temperatura en la cámara de secado se elevaría demasiado por la alta entalpia del vapor.

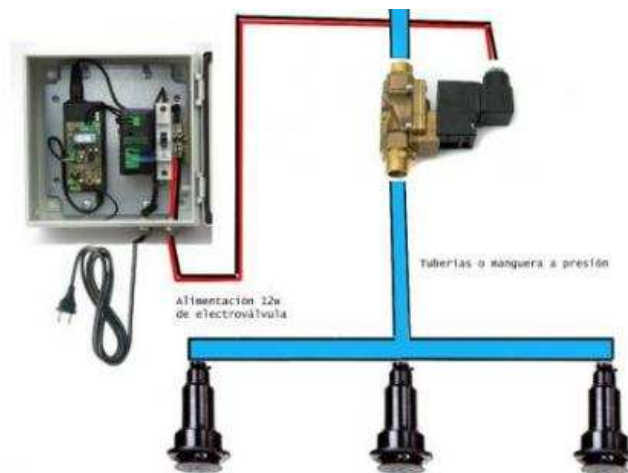


Figura 2. 24 Sistema de humectación con atomizadores

2.3.3.5. SISTEMAS DE OPERACIÓN

2.3.3.5.1. DISPOSITIVOS DE MEDICIÓN Y CONTROL DE TEMPERATURA



Figura 2. 25 Pistola medidora de temperatura

Tabla 2.4 Características técnicas de la pistola medidora de temperatura

CARACTERISTICAS TECNICAS	
- Marca	Testarck
- Modelo	XT 150-L
- Posee mira laser.	
- Pantalla	1.2inch LCD, color azul
- Rango de temperatura	-50 °C - 380 °C(-58 ~ 716 °F)
- Precisión	±2 °C

El sistema de control de temperatura dentro de la cámara de secado puede ser manual, automático o semiautomático. Se toma como referencia para indicar la temperatura dentro del secador, a la temperatura que nos indica el termómetro de bulbo seco.

Como la madera a secar, y los equipos dentro de la cámara de secado, representan una gran cantidad de dinero, es recomendable que se instale un dispositivo que permita controlar automáticamente la temperatura.

En este caso se lo realiza con válvulas solenoides o neumáticas que abren o cierran el paso del agua o vapor, según las necesidades del programa de secado.

Los termómetros más usados son los de mercurio o bimetálicos que permiten tener una lectura directa. Se lo coloca en la parte media de la cámara, en uno de los pasillos laterales perpendicular o paralelo a la pared, en donde exista libre circulación de aire.

Existen equipos portátiles como la pistola medidora de temperatura figura 2.25 los cuales cuentan con láser, el cual detectan la temperatura hacia donde está apuntando el láser.

2.3.3.5.2. DISPOSITIVOS DE MEDICIÓN Y CONTROL DE LA HUMEDAD RELATIVA



Figura 2. 26 Dispositivo medidor de humedad

Tabla 2.5 Características técnicas del dispositivo de humedad

CARACTERISTICAS TECNICAS	
- Marca	Extrech
- Modelo	MO290-P
- Lecturas de la humedad	Min / Max registros de las máxima y mínima.
- Pantalla	1.2 inch LCD, color azul
- Rango de temperatura	0 % - 100 % rh
- Precisión	$\pm 2\%$

El control de la humedad relativa del ambiente dentro de la cámara de secado, se puede hacer automático con la ayuda de dispositivo de humedad figura 2.26.

Si el control es manual, se lo hace con la ayuda del psicrómetro. Éste es un instrumento que consta de dos termómetros.

El primero permanece siempre seco y nos indica la temperatura real del aire y el otro mantiene su parte sensitiva cubierta por una tela de algodón húmeda absorbente por lo que se lo denomina termómetro de bulbo húmedo.

El agua que conserva húmeda esta tela se debe mantener a un nivel constante en su recipiente y debe estar libre de incrustaciones que modifiquen su lectura, de preferencia se utiliza agua destilada o agua de lluvia.

El termómetro de bulbo húmedo por estar en contacto con el agua, sufre una refrigeración por evaporación, y marca una temperatura menor, midiendo entonces la temperatura ambiente menos la pérdida de calor causada por la evaporación.

Una vez teniendo la diferencia psicrométrica que corresponde a la diferencia de temperaturas de bulbo húmedo y bulbo seco, nos ayudamos de la carta psicrométrica para saber la humedad relativa del ambiente dentro del secador.

La carta psicrométrica muestra gráficamente los valores característicos de la mezcla aire-vapor de agua, tales como temperatura de bulbo seco, bulbo húmedo, punto de rocío, humedad relativa del aire, volumen específico, contenido de humedad del aire, y el calor total almacenado por la mezcla (entalpía del aire húmedo). Ver Figura 2.27.

Existe una carta psicrométrica para cada lugar dependiendo de la altura a la que éste se encuentre.

Para el control manual también pueden utilizarse los termohigrómetros, que son instrumentos que registran gráficamente la temperatura y humedad relativa. En la actualidad se cuenta con controles automáticos, que mediante sistemas computarizados operan a partir de los cambios de humedad que presenta la madera.

Pressure 93.69 kPa
Altitude 656 m

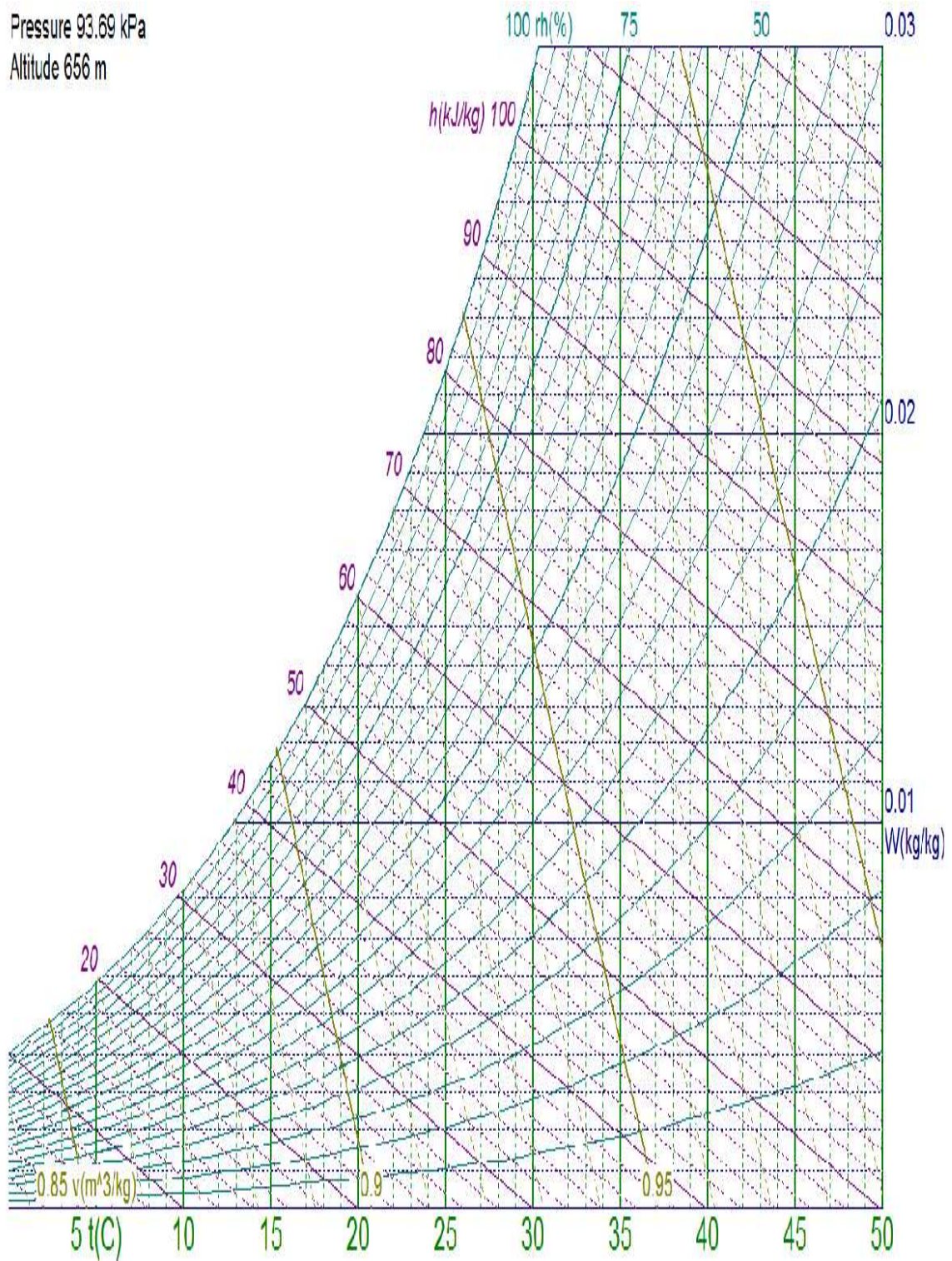


Figura 2. 27 Carta psicrométrica, aplicable a una presión de 93.69 kPa³⁰.

³⁰ web: <http://www.unalmed.edu.co/~geiq/psicrometrica.zip>

2.3.3.5.3. DISPOSITIVOS DE MEDICIÓN Y CONTROL DE HUMEDAD DE LA MADERA

Existen dos métodos para determinar el contenido de humedad de la madera. El primero es utilizando un medidor eléctrico, y el segundo es comparando el peso de una probeta de madera, en estado húmedo y después del proceso de secado.



Figura 2. 28 Medidor eléctrico de Humedad (Primer método)



Figura 2. 29 Comparación del peso de la probeta de madera (Segundo método)

2.3.3.5.4. MEDICIÓN ELÉCTRICA

La resistencia eléctrica en la madera, depende especialmente de su contenido de humedad. Es decir, cuanto más húmeda es la madera, menos resistencia eléctrica tiene.

La conductividad de la madera no solo depende de la cantidad de agua que posea, sino que también depende de la temperatura. Cuanto más caliente es la

madera, mayor es su conductividad, y por consiguiente mayor la humedad que marca el medidor.

En caso de que el medidor eléctrico, que no tenga la posibilidad de graduar la temperatura de la madera, esto significa que el medidor está calibrado para una temperatura de 20°C, y por lo tanto los valores que arroja son erróneos. En estos casos es necesaria la ayuda de una tabla, que nos rectifica la humedad que marca el medidor. Ver Tabla 2.7.

La resistencia eléctrica de diferentes tipos de maderas, con igual contenido de humedad, no es idéntica, y es por esto que estas pequeñas diferencias en la conductividad eléctrica, deben ser consideradas en la calibración del medidor.

El medidor de humedad del tipo resistencia de la figura 2.30 viene con dos electrodos, que se introducen en diferentes piezas representativas de la pila de madera.



Figura 2. 30 Medidor de humedad del tipo resistencia

Tabla 2.6 Características técnicas del medidor de humedad del tipo resistencia

CARACTERISTICAS TECNICAS	
Modelo DUC2050	
- Principio de medición de la constante dieléctrica	
- Visor en LCD con 3,5 dígitos	
- Rango de medición	5% hasta 40%
- Densidad de la madera	0,35 hasta 0,99g/cm ³
- Precisión	0,1%

Tabla 2.7 Corrección de la humedad de la madera por temperatura.³¹

**TEMP.
MADERA
(°C)**

**HUMEDAD REAL DE LA
MADERA**

-35	7	9	11	13	14,5	17	18,5	21	22,5	24,5	26
-30	6,5	8	10	12	13,5	15,5	17	19	21	22,5	24
-25	6	7,5	9	11	12,5	14	16	17,5	19	21	22,5
-20	5,5	7	8,5	9,5	11,5	13	15	16	18	19	21
-15	5	6,5	8	9	10,5	12	14	15	16,5	18	19,5
-10	4,5	6	7,7	8,5	10	11,5	13	14	15,5	17	18
-5	4	5,5	7	8	9,5	10,5	12	13	14,5	16	17
0	4	5	6,5	7,5	9	10	11	12,5	13,5	15	16
5	3,5	5	6	7	8,5	9,5	10,5	12	13	14	15
10	3,5	4,5	5,5	7	8	9	10	11	12	13,5	14,5
15	3	4	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5	11,5	12,5	13,5
20	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
25	3	4	5	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5	11,5	12,5
30	2,5	3,5	4,5	5,5	6	7	8	9	10	11	12
35	2,5	3,5	4,5	5	6	7	8	9	9,5	10,5	11,5
40	2,5	3	4	5	6	7	7,5	8,5	9	10	11
45	2	3	4	4,5	5,5	6	7	8	9	9,5	10,5
50	2	3	3,5	4,5	5	6	7	8	8,5	9	10
55	2	2,5	3,5	4	5	6	6,5	7,5	8	9	9,5
60	2	2,5	3,5	4	5	5,5	6	7	8	8,5	9
65	2	2,5	3	4	4,5	5,5	6	7	7,5	8,5	9
70	1,5	2,5	3	4	4,5	5	6	6,5	7	8	8,5
75	1,5	2	3	3,5	4,5	5	5,5	6	7	7,5	8
80	1,5	2	2,5	3,5	4	5	5,5	6	6,5	7,5	8
85	1,5	2	2,5	3,5	4	4,5	5	6	6,5	7	7,5
90	1,5	2	2,5	3	4	4,5	5	5,5	6	7	7,5
95	1	2	2,5	3	3,5	4,5	5	5,5	6	6,5	7
100	1	1,5	2	3	3,5	4	4,5	5,5	6	6,5	7

3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13

HUMEDAD SEGÚN MEDIDOR

³¹ Manual del Grupo Andino para el secado de maderas, Junta del Acuerdo de Cartagena, Primera edición. Lima. Pp. 3-55. Copyrigh. 1989

**Tabla 2.7 Corrección de la humedad de la madera por temperatura³¹.
(Continuación)**

TEMP.

MADERA

**HUMEDAD REAL DE LA
MADERA**

(°C)

-35	28	30,5	32	34	36	38	39,5	41	43,5	45	47	49,5
-30	26	28	29,5	31,5	33	35	36,5	38,5	40	42	44	45,5
-25	24	25,5	27,5	29	30,5	32,5	33,5	35,5	37	39	41	42
-20	22,5	24	25,5	27	28,5	30	31,5	33	34,5	36	38	39
-15	21	22,5	24	25	26,5	28	30	31	32,5	34	35	36,5
-10	19,5	21	22,5	23,5	25	27	28	29	30,5	32	33	34,5
-5	18,5	19,5	21	22	23,5	24,5	26	27,5	28,5	30	31	32,5
0	17	18,5	19,5	21	22	23	24,5	26	27	28,5	29,5	30,5
5	16,5	17,5	18,5	20	21	22	23	24,5	25,5	27	28	29
10	15,5	17	18	19	20	21	22	23	24	25,5	26,5	27,5
15	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
20	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
25	13,5	14,5	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
30	13	14	14,5	15,5	16,5	17	18	19	20	21	22	23
35	12,5	13	14	15	16	16,5	17,5	18,5	19	20	21	22
40	12	12,5	13,5	14,5	15	16	17	18	18,5	19	20	21
45	11,5	12	13	14	14,5	15,5	16	17	18	18,5	19	20
50	11	11,5	12,5	13,5	14	15	15,5	16,5	17,5	18	18,5	19
55	10,5	11	12	13	13,5	14,5	15	16	17	17,5	18	18,5
60	10	10,5	11,5	12,5	13	14	14,5	15,5	16,5	17	17,5	18
65	9,5	10,5	11	12	12,5	13,5	14	15	16	16,5	17	17,5
70	9,5	10	10,5	11,5	12	13	13,5	14,5	15,5	16	16,5	17
75	9	10	10,5	11	11,5	12,5	13	14	15	15,5	16	16,5
80	9	9,5	10	10,5	11	12	13	13,5	14,5	15	15,5	16
85	8,5	9	10	10,5	11	11,5	12,5	13	14	14,5	15	15,5
90	8,5	9	9,5	10	10,5	11	12	12,5	13,5	14	14,5	15
95	8	8,5	9,5	10	10,5	10,5	11,5	12	13	13,5	14	14,5
100	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12,5	13	13,5	14
	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25

HUMEDAD SEGÚN MEDIDOR

³¹Manual del Grupo Andino para el secado de maderas, Junta del Acuerdo de Cartagena, Primera edición. Lima. Pp. 3-55. Copyright. 1989.

2.3.3.5.5. MEDICIÓN POR DESHIDRATACIÓN

Es el método que da resultados más satisfactorios en la determinación del contenido de humedad de la madera.

Se utiliza un horno de preferencia con termostato regulable, para mantener una temperatura de $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ y con una buena circulación de aire, ya que con temperaturas más elevadas, ciertas resinas de la madera podrían evaporarse y darnos valores erróneos.

Al final del proceso de secado de la madera, todavía puede encontrarse entre un 0,2% a 0,5% de humedad, que es prácticamente despreciable.

Es importante pesar las probetas inmediatamente después de su corte, pues pueden entregar parte de su humedad al medio ambiente, y por lo tanto el resultado que se obtenga sería menor al real.

La figura 2.31 muestra, las probetas o muestras de control, como se deben cortar de unos 15 a 20 cm de espesor en la dirección del grano, y a una distancia de por lo menos 50 cm del extremo, ya que éstos pueden tener un contenido de humedad menor. Las herramientas para el corte deben estar bien afiladas para evitar pérdidas de humedad por recalentamiento de las superficies de corte.

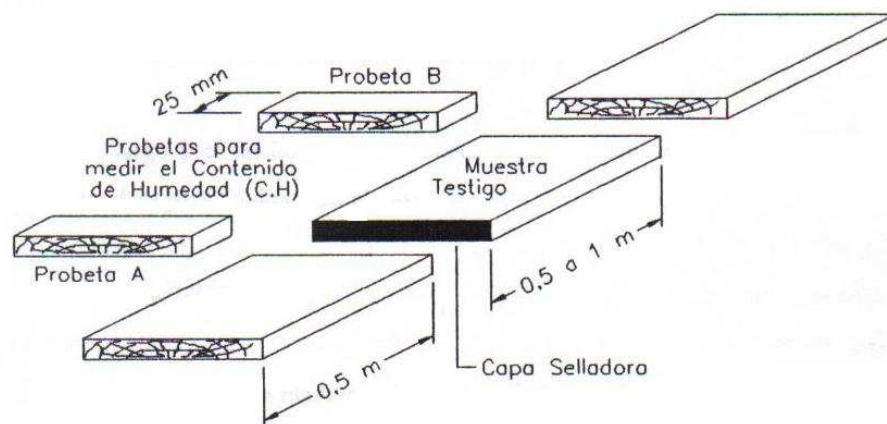


Figura 2. 31 Probetas para determinar el contenido de humedad de una pieza de madera

La principal desventaja de este método, es el largo período de tiempo necesario para obtener la probeta completamente seca, el cual puede ser de 20 a 60 horas para probetas³² de 100 kg.

Durante el proceso de secado artificial, la humedad se controla mediante los llamados *testigos*, que son piezas de madera que se introducen en el centro de la pila, de tal forma que sea posible sacarlos permanentemente para el control de su peso.

Se considera que toda la madera, en la cámara de secado tiene el mismo contenido de humedad que el testigo, y de acorde a éste se regula el proceso de secado

2.3.4. PREPARACIÓN DE LA MADERA PARA EL SECADO

2.3.4.1. CLASIFICACIÓN

Se presentan a continuación aspectos prácticos que se deben tomar en cuenta para el secado de la madera como su clasificación de acuerdo a los siguientes criterios:

POR ESPECIE

Maderas de secado rápido o lento, tendencia a sufrir defectos, necesidades de mercado y/o producción.

POR ESPESOR

La velocidad del secado es afectada por el espesor de la madera. Las piezas de menor espesor se secan primero.

POR ANCHO

Es conveniente organizar las piezas de forma tal que queden espacios homogéneos y verticales “chimeneas” en el interior de la pila.

³² Manual del Grupo Andino para el secado de maderas, Junta del Acuerdo de Cartagena, Primera edición. Lima. . Pp. 1-12. Copyrigh. 1989

POR LONGITUD

Asegurar una restricción mecánica y evitar deformaciones y rajaduras por extremos (alineamiento de separadores), el apilado es más fácil con piezas de la misma longitud.

POR CONTENIDO DE HUMEDAD

La madera aserrada proviene de distintos lotes de producción, lo que implica CH iniciales distintos, por lo que es conveniente separar diferentes espesores y especies.

POR CALIDAD

Conviene clasificar por grados de calidad para secar la madera de mayor valor en condiciones menos severas. A veces la madera de menor calidad se usa para proteger las partes superiores y laterales de las pilas.

2.3.4.2. APILADO

La uniformidad del secado en la madera depende de muchos factores, y uno de ellos es la homogeneidad con que pasa el aire a través de la pila de madera. Por esta razón, el apilado de la madera se lo debe hacer correctamente y siguiendo todas las recomendaciones que a continuación se van a indicar.

El apilado horizontal es la forma más utilizada en el secado artificial, ha sido desarrollada aprovechando la ventaja de transporte en montacargas, que pueden a su vez elevarlos al sitio que les corresponde en la pila. Estos paquetes pueden ser formados a mano o en forma automática y son generalmente colocados sobre plataformas con guías para los listones separadores.

Para empresas pequeñas que no poseen montacargas, las pilas de madera son levantadas por operarios, los mismos que deben disponer de suficiente espacio y comodidad para que puedan desarrollar su labor en forma eficiente.

El número de operarios que se necesitan, está limitado por el peso de cada uno de los tablonos de madera, y del número de tablonos que se tenga para apilar.

Las características del paquete son:

- La altura depende fundamentalmente del espesor de las tablas a secar, de la altura de los listones separadores, de la capacidad y características del montacargas. Lo más común es apilar en paquetes con alturas de 1 a 1,50 m.
- El ancho de la pila está en relación al largo de los brazos del montacargas. Generalmente es de 1,20 m. Se recomienda dejar un espacio de 2 cm entre canto y canto de las tablas.
- Con el objetivo de facilitar el ingreso de los brazos del montacargas a la pila, se colocan travesaños de madera llamados estibas, que tienen una sección transversal aproximada de 10 x 10 cm y largo igual al ancho del paquete.

La madera que se utiliza para las estibas debe tener las siguientes características

- Alta resistencia mecánica
- Debe ser seca, libre de torceduras y rajaduras
- Debe ser estable dimensionalmente
- Su sección transversal debe ser uniforme en toda su longitud
- En lo preferible deben estar hechos de madera tratada, para que resista el ataque de insectos y hongos.

2.3.4.3. LISTONES SEPARADORES

Los separadores son listones de madera por lo general de sección transversal cuadrada, que alineados vertical (altura de pila) y horizontalmente (distancia entre separadores) se utilizan para separar hileras o camas de madera

aserrada, facilitando así la circulación de aire a través de la pila. Deben fabricarse con madera libre de defectos y seca (CH = 10-15%).

Para disminuir la aparición de grietas por extremos en la madera, se debe alinear separadores cerca de los extremos de la madera apilada. Cuando se sequen maderas con alta tendencia a deformarse se adoptarán los límites inferiores tanto del espesor de separador como el distanciamiento entre separadores, mientras que si se seca madera con tendencia moderada y/o baja a la deformación se adoptarán los límites superiores de espesor de separador y distancia entre separadores.

Recomendaciones en espesor y distanciamiento de los separadores, de acuerdo al espesor de la madera a secar.

Tabla 2.8 Características de los listones separadores³³

Espesor de las tablas (mm)	Altura de los separadores (mm)	Distancia entre separadores (mm)
menos de 20	20	300-400
20-40	25	400-500
40-50	30	500-600
50-65	35	700-800
65-80	40	900
más de 80	45	1000

2.3.4.4. DISPOSICIÓN, ESPACIAMIENTO Y ALINEACIÓN DE LOS SEPARADORES

En las áreas de contacto de los listones separadores con las tablas, el secado se retarda, por lo que no es conveniente utilizar más separadores que los necesarios.

³³ Manual del Grupo Andino para el secado de maderas, Junta del Acuerdo de Cartagena, Primera edición. Lima. Pp. 3-25. Copyrigh. 1989

Los separadores colocados en los extremos de las pilas deben formar un solo plano con la superficie transversal de los tablones ver figura 2.32, para reducir al mínimo el apareamiento de rajaduras y grietas

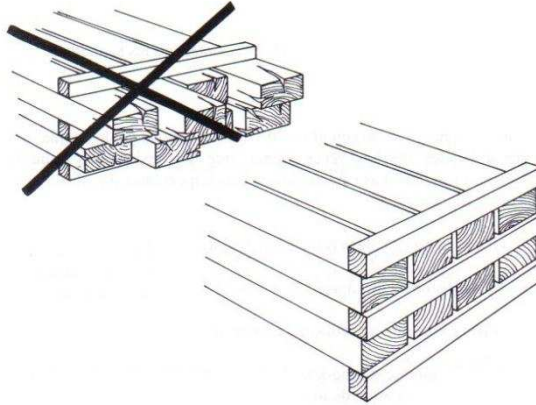


Figura 2. 32 Alineamiento de los separadores en los extremos de la pila

Con un apropiado alineamiento vertical de los listones separadores, se evitan los defectos de torceduras y curvaturas en las tablas de las partes inferiores de las pilas, que son ocasionadas por el peso de la tablas que se encuentran en la parte superior, cuando los separadores están mal alineados.

2.3.4.5. COCHES PORTAPILAS

Los coches portapilas son carritos metálicos sobre los cuales se apila la madera para poder movilizarla con facilidad.

Como son metálicos, deben estar protegidos para evitar la corrosión producida por la humedad y los ácidos de la madera.

La utilización de coches para apilar madera tiene las siguientes ventajas

- La duración del proceso de secado, es mi tiempo muerto para los trabajadores, el cual se aprovecha para cargar la madera que va a ser secada posteriormente.
- En hornos que no posean este tipo de coches, el apilado de la madera se lo hace en bases fijas dentro de la cámara de secado, lo que dificulta la

carga y descarga porque no existe espacio suficiente para moverse dentro de ella.

- Si se cuenta con un sistema de prensado para evitar que la madera pandee, los coches portapilas ayudan a disminuir los defectos del secado.



Figura 2. 33 Carro especial para el secado artificial con prensado automático de la carga

2.3.5. ETAPAS DEL PROCESO DE SECADO

En el proceso de secado de madera aserrada en hornos, existen etapas que son comunes a todas las especies maderables.

2.3.5.1. ETAPA DE CALENTAMIENTO

En esta etapa se desean alcanzar los siguientes objetivos:

- Alcanzar las condiciones de temperatura y humedad relativa (HR) del aire dentro de la cámara.
- Homogenizar la temperatura de toda la carga de madera, así como también se busca homogenizar el contenido de humedad (CH) inicial de la carga.

Esta etapa es la primera en el proceso de secado. Aquí se eleva progresivamente la temperatura hasta alcanzar la indicada para la primera etapa establecida en el programa de secado. El cálculo del requerimiento calórico para esta etapa debe considerar la energía necesaria para elevar la temperatura de los elementos que se encuentran en el interior de la cámara, como ventiladores, paneles, rieles, etc.

El tiempo de calentamiento depende de la potencia del sistema de calefacción instalada, y se calcula aproximadamente en un hora de calentamiento por cada centímetro de espesor para maderas livianas y dos horas por centímetro para maderas densas, cuando su contenido inicial de humedad es superior al 30%.

Tabla 2.9. Tiempo de calentamiento según la densidad de la madera³⁴

TIEMPO DE CALENTAMIENTO	ESPESOR	
	≤ 30 mm	> 30 mm
DENSIDAD < 450 Kg/m ³	1,0-1,5 horas	1,5-2,0 horas
450 - 600 Kg/m ³	1,5-2,0 horas	2,0-2,5 horas
600-800 Kg/m ³	2,0-2,5 horas	2,5-3,0 horas
> 800 Kg/m ³	2,5-3,0 horas	3,0-3,5 horas

Es muy importante que la madera en esta fase no empiece a secarse, porque puede producir defectos como el endurecimiento y en casos extremos el colapso. Para esto, es necesario mantener una elevada humedad relativa del aire, lo que se consigue con una diferencia psicrométrica baja ΔT de 1 a 2°C.

Esta alta humedad relativa, permite una rehumectación superficial y por lo tanto una homogeneización de la humedad hacia el interior de la pieza de madera.

El consumo de energía térmica en esta fase de calentamiento, es la más alta, y se estima en un 12% de la energía total requerida³⁵.

³⁴ SECAP-GTZ. (1991). El secado de madera. Primera edición. Quito. OFFSET, SECAP.pp.31

³⁵ Junta del Acuerdo de Cartagena. (1989). Manual del Grupo Andino para el secado de maderas. Primera edición. pp. 4-22.

Tabla 2.10 Esquema de calentamiento según el contenido de humedad inicial³⁶

CH Inicial de la madera	DENSIDAD < 500 kg/m ³			DENSIDAD > 500 kg/m ³		
	ΔT °C	ECH %	HR %	ΔT °C	ECH %	HR %
CH > 50 %	2,0-3,0	17-15	90-84	1,5-2,5	18-16	92-87
30-50 %	2,0-4,0	17-13	90-79	2,0-3,0	17-15	90-84
20-30 %	3,0-4,0	15-13	84-79	2,5-3,5	16-14	87-79
CH < 20 %	3,0-4,0	15-13	84-79	3,0-4,0	15-13	84-79

2.3.5.2. ETAPA DE SECADO

En esta etapa se desean alcanzar los siguientes objetivos:

- Alcanzar CH final establecido en el menor tiempo posible.
- Obtener CH final homogéneo en toda la carga y menor cantidad de defectos.

La figura 2.34 describe las etapas de secado, que se subdivide en dos etapas:

:

La primera, consiste en reducir el contenido de humedad de la madera desde su estado verde, o desde su contenido de humedad inicial hasta el punto de saturación de las fibras. En esta etapa, bajo condiciones estables de temperatura y humedad relativa del aire, la velocidad de secado permanece constante.

La segunda etapa consiste en continuar con el secado desde el punto de saturación de las fibras hasta su contenido de humedad final. La velocidad de secado cambia de una línea recta a una curva exponencial decreciente.

³⁶ Junta del Acuerdo de Cartagena. (1989). Manual del Grupo Andino para el secado de maderas. Primera edición. pp. 4-22.

Finalmente, la curva tiende a un valor límite que corresponde a la humedad de equilibrio de la madera, según las condiciones climáticas establecidas.

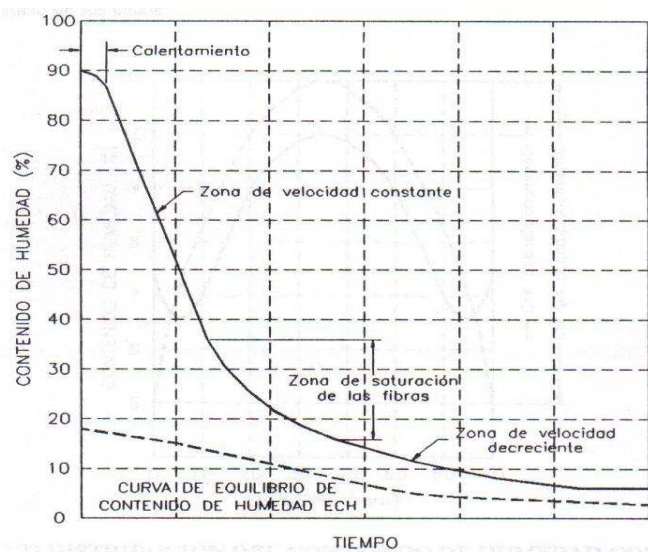


Figura 2. 34 Curva teórica de secado³⁷

Es decir; en esta etapa la madera ya ha elevado su temperatura y comienza a reducir su contenido de humedad. Las condiciones dentro de la cámara se van modificando a medida que transcurre el secado, de acuerdo a lo establecido en el programa de secado.

2.3.5.3. ETAPA DE POST-SECADO

Se tiene los siguientes tratamientos en post-secado:

2.3.5.3.1. IGUALACIÓN

El objetivo es homogenizar el CH de todas las tablas que componen la carga. Este tratamiento se inicia cuando la tabla más seca tiene 2% de CH menos que el CH final deseado y termina cuando la tabla más húmeda alcanza el CH final deseado. El CHE deberá ser igual al CH de la tabla más seca.

³⁷ Junta del Acuerdo de Cartagena. (1989). Manual del Grupo Andino para el secado de maderas. Primera edición. pp. 2-35.

2.3.5.3.2. ACONDICIONAMIENTO

Tiene doble objetivo, reducir o eliminar las tensiones de secado entre la superficie y el interior de la pieza y homogenizar el CH en el espesor de la pieza. El tiempo de acondicionamiento depende del espesor de la madera, del gradiente - humedad y de la especie. Generalmente, un tiempo doble al de calentamiento es válido para la mayoría de los casos.

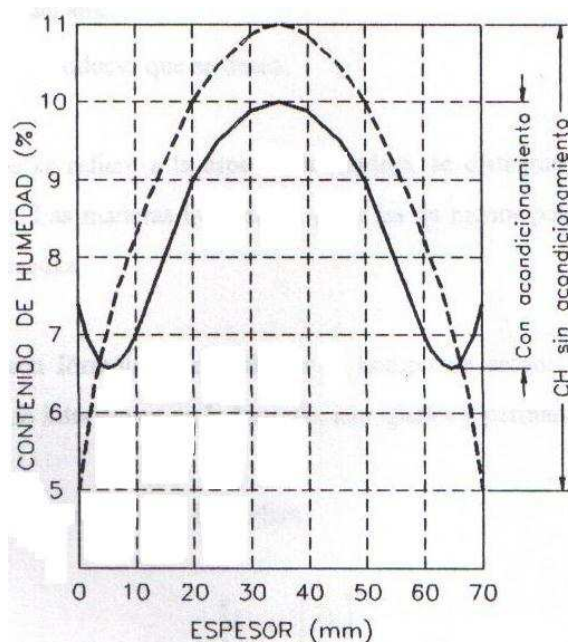


Figura 2. 35 Distribución del contenido de humedad con y sin acondicionamiento final en una tabla de 70 mm de espesor³⁸

2.3.5.4. ENFRIAMIENTO

Una vez finalizado el secado y realizados los tratamientos anteriores, es conveniente enfriar la madera dentro de la cámara para evitar el riesgo del restablecimiento de las tensiones de secado.

Con esta fase termina el proceso de secado. Se desconecta el sistema de calefacción y se abre ligeramente las ventilas para el intercambio del aire caliente con el aire frío. Es necesario bajar la temperatura progresivamente hasta un valor

³⁸ Junta del Acuerdo de Cartagena. (1989). Manual del Grupo Andino para el secado de maderas. Primera edición. pp. 4-22.

comparable con la temperatura exterior y mantener una diferencia psicrométrica similar a la del período de acondicionamiento.

2.3.6. TIEMPO DE SECADO

El tiempo de secado depende de los siguientes parámetros:

- Especie de madera
- Espesor
- Humedad inicial y final de la madera
- Temperatura de secado
- Velocidad del aire
- Calidad del producto que se desea

En lo que se refiere a la especie de madera, se distingue principalmente entre coníferas y frondosas. Las maderas livianas, es decir las de menor peso específico se secan más rápido que las pesadas.

Se conocen fórmulas para calcular el tiempo de secado, suponiendo que las demás variables que no intervienen en la fórmula, son iguales y permanecen constantes³⁹

En relación al espesor de la madera.

$$\frac{t_2}{t_1} = \left(\frac{e_2}{e_1}\right)^n \quad \text{Ec. 2.17}$$

t_1	Tiempo de secado conocido	horas
t_2	Tiempo de secado desconocido	horas
e_1	Espesor de la madera de tiempo de secado conocido	mm
e_2	Espesor de la madera de tiempo de secado desconocido	mm
n	Índice que está en función del espesor de la madera	

Generalmente $n = 2$

Para madera delgada $1,25 < n < 1,9$

³⁹SECAP – GTZ (1991). El secado de madera. Primera edición. Quito- OFFSET. Pp. 34.

Para chapas n = 1

Con respecto a la temperatura de secado, en un rango de 40 a 90 °C.

$$\frac{t_2}{t_1} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{1,5} \quad \text{Ec. 2.18}$$

T₁ Temperatura aplicada para el tiempo de secado conocido horas

T₂ Temperatura aplicada para el tiempo de secado desconocido horas

En relación a la velocidad de flujo de aire dentro de la cámara de secado

$$\frac{t_2}{t_1} = \left(\frac{\vartheta_1}{\vartheta_2}\right)^{0,6} \quad \text{Ec. 2.19}$$

ϑ₁ Velocidad del aire aplicada para el tiempo de secado conocido m/s

ϑ₂ Velocidad del aire aplicada para el tiempo de secado desconocido m/s

Combinando las expresiones anteriores en una sola fórmula, se tiene

$$t_s = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{e}{25}\right)^{1,5} \left(\frac{65}{T}\right)^{1,5} \left(\frac{1,5}{\vartheta}\right)^{0,6} LN\left(\frac{CH_i}{CH_f}\right) \quad \text{Ec. 2.20}$$

ts Tiempo de secado horas

α Factor de proporcionalidad de la madera.

Para maderas blandas 0,0477

Para maderas duras 0,0265

e Espesor de la madera mm

T Temperatura de secado. Calcular para cada fase °C

ϑ Velocidad del aire m/s

CH_i Contenido de humedad inicial %

CH_f Contenido de humedad inicial %

Al tiempo de secado hay que añadirle el tiempo requerido para el calentamiento de la madera, así como también el tiempo de acondicionamiento y enfriamiento de la misma.

Esta fórmula relaciona la mayoría de parámetros que intervienen en el tiempo de secado, pero presenta un inconveniente en el instante de escoger el valor correcto del factor de proporcionalidad, que está en relación con el peso específico de la madera.

Una manera más fácil, es determinar el tiempo de secado básico para una madera estándar, dependiendo de su humedad inicial y final, y luego multiplicarlo por factores de corrección correspondientes a

- La temperatura real de secado
- El espesor de la madera
- El peso específico de la madera
- El estado de secado
- La velocidad del aire
- Y finalmente, el factor para maderas difíciles de secar

El tiempo básico de secado, se determina a partir de las Figuras 2.22 y 2.23 para maderas frondosas y coníferas respectivamente⁴⁰.

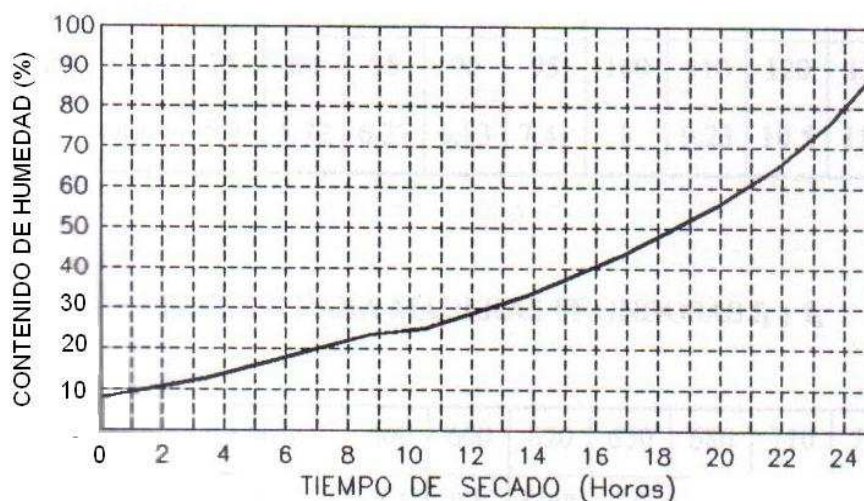


Figura 2. 36 Tiempo básico de secado para madera conífera

⁴⁰ SECAP – GTZ (1991). El secado de madera. Primera edición. Quito- OFFSET. pp. 37-39

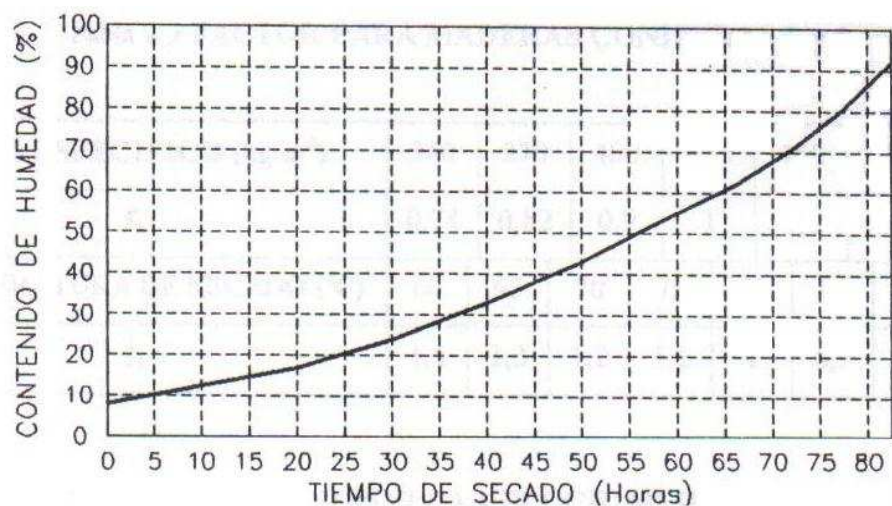


Figura 2. 37 Tiempo básico de secado para la madera frondosa

2.3.6.1. FACTORES DE CORRECCIÓN PARA EL TIEMPO DE SECADO

Tabla 2.11 Factor por el espesor de la madera f_1 ⁴¹

Espesor (mm)	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
f_1	0,46	0,72	1	1,31	1,66	2,02	2,43	2,83	3,28	3,72	4,20
Espesor (mm)	70	75	80	85	90	95	100	110	120	130	140
f_1	4,68	5,2	5,72	6,27	6,83	7,41	8	9,23	10.5	11.9	13.3

Tabla 2.12 Factor para maderas frondosas f_2 y f_3 ⁴²

PESO ESPECIFICO (kg/m^3)	500	600	620	650	680	710	740	770	
f_2	0,7	0,8	0,88	0,9	1	1,1	1,12	1,2	
TEMPERATURA DE SECADO ($^{\circ}\text{C}$)	55	60	65	70	75	80	85	90	95
f_3	1,7	1,5	1,3	1,2	1,1	1	0,9	0,8	0,7

⁴¹ Appel, Josef. Proyecto Promadera. Editorial Cormadera. Tabla 2.3

⁴² Appel, Josef. Proyecto Promadera. Editorial Cormadera. Tabla 2.3

Tabla 2.13 Factor para maderas coníferas f_2 y f_3 ⁴³

PESO ESPECIFICO (kg/m ³)	340	370	400	430	460	490	520
f_2	0,74	0,82	0,9	1	1,1	1,2	1,3
TEMPERATURA DE SECADO (°C)	60	65	70	75	80	85	90
f_3	1,5	1,3	1,2	1,1	1	0,9	0,8

Tabla 2.14 Factor por la velocidad del aire f_4 ⁴⁴

VELOCIDAD (m/s)	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3
f_4	1,19	1,08	1	0,93	0,87	0,83	0,78

Tabla 2.15 Factor para maderas difíciles de secar f_5 ⁴⁵

ESPECIES DE MADERA	EUCALIPTO	LAUREL TIERNO
f_5	2	1,4

Tabla 2.16 Factor por agua libre f_6 ⁴⁶

f_6	1,1 Tiempo de secado hasta PSF
-------	--------------------------------

A continuación se realiza un ejemplo de aplicación.

Calcular el tiempo de secado de una madera de las siguientes características

- Tablas de cedro, frondosa, de un peso específico de 600 kg/m³
- Espesor de la madera 50 mm
- Humedad inicial 74 %.

⁴³ Appel, Josef. Proyecto Promadera. Editorial Cormadera. Tabla 2.3

⁴⁴ Appel, Josef. Proyecto Promadera. Editorial Cormadera. Tabla 2.3

⁴⁵ Appel, Josef. Proyecto Promadera. Editorial Cormadera. Tabla 2.3

⁴⁶ Appel, Josef. Proyecto Promadera. Editorial Cormadera. Tabla 2.3

- Humedad final 10 %
- Temperatura de secado hasta el punto de saturación de las fibras 55 °C
- Temperatura de secado bajo el punto de saturación de las fibras 70 °C
- Velocidad del aire en la cámara de secado 2 m/s

Solución.

- Tiempo básico de secado, según Figura 2.23
 De 74% a 30% 73 h - 37 h = 36 h
 De 30% a 10% 37 h - 6 h = 31 h
- Factores de multiplicación
 Factor de espesor 50 mm f_1 2,83
 Factor de peso específico f_2 0,8
 Factor de temperatura 55 °C f_3 1,7
 Factor de temperatura 70 °C f_4 1,2
 Factor por velocidad del aire f_5 1
 Factor de agua libre f_6 1,1
- El tiempo de secado corregido por los factores de multiplicación sería

$t_{\text{Hasta PSF}}$	$36(2,83 \times 0,8 \times 1,7 \times 1 \times 1,1) = 152$	horas
$t_{\text{Bajo PSF}}$	$31(2,83 \times 0,8 \times 1,2)(1) = 84$	horas
t_{Secado}	$152 + 84$	horas
$t_{\text{Calentamiento}}$	$= 8$	horas
$t_{\text{Acondicionamiento}}$	$= 16$	horas
$t_{\text{Enfriamiento}}$	$= 8$	horas
$t_{\text{Total de secado}}$	$= 268$	horas

2.3.6.2. PLANO DE SECADO

Es una representación gráfica del proceso de secado, el cual nos facilita su control y operación.

A continuación se indica el plano de secado en un papel semilogarítmico, correspondiente al ejercicio anterior.

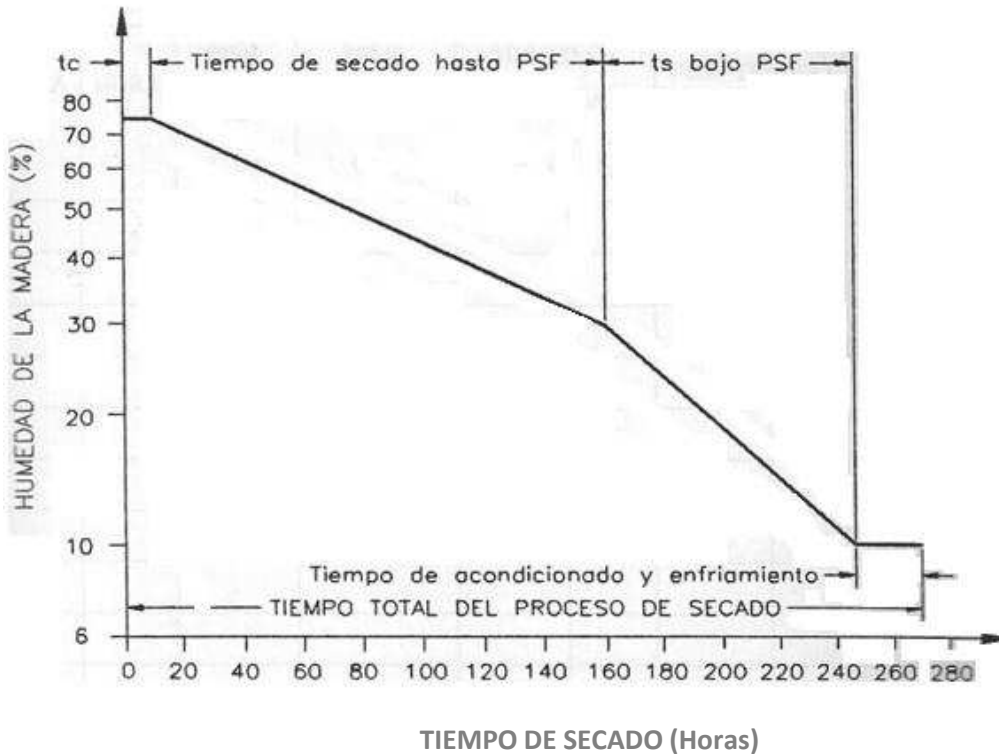


Figura 2. 38 Plano de secado⁴⁷

En la realidad no se obtienen estas cuatro rectas perfectas, pero si se diferencian claramente las etapas del secado.

Como guía para elaborar ésta gráfica se utiliza un plano de secado literal en el cual se indica toda la información del proceso de secado.

A continuación se indica el formato más común, aclarando que puede ser modificado de acuerdo al tipo de horno que se tenga y a las condiciones de secado.

⁴⁷ Fuente Propia

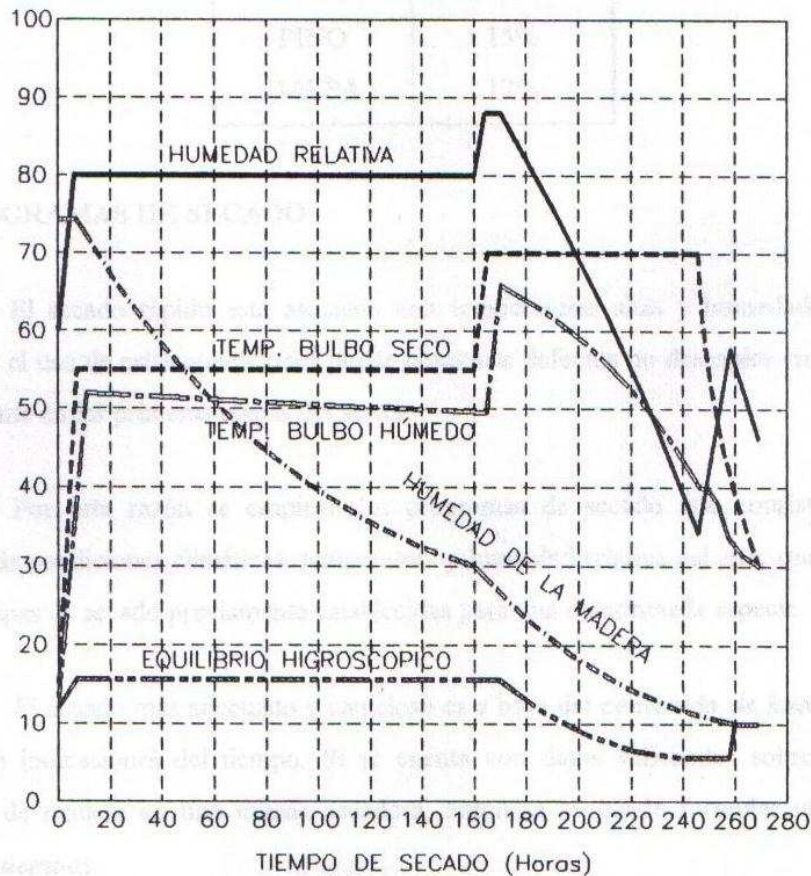


Figura 2. 39 Proceso de secado⁴⁸

Se puede observar en la curva de equilibrio higroscópico, que éste se mantiene constante cuando la humedad de la madera está sobre el punto de saturación de las fibras, entre un valor de 12% y 19% según sea la especie. Se puede tomar como datos referenciales los presentados en la siguiente tabla:

Tabla 2.18 Equilibrio higroscópico inicial para diferentes maderas⁴⁹

ESPECIE	E.C.H inicial
ROBLE	19% -20%
EUCALIPTO	19% -20%
CAOBA	17%
CEDRO	16%
LAUREL	15%
PINO	15%
BALSA	12%

⁴⁸ Web:www.monografias.com/trabajos12/origmem/origmem2.shtml

⁴⁹ SECAP-GTZ. (1991). El secado de madera. Primera edición. Quito. OFFSET, SECAP.pp.43

2.3.7. PROGRAMAS DE SECADO

El secado rápido está asociado con temperaturas altas y humedades relativas bajas, pero el uso de estas condiciones puede ocasionar defectos no deseables en la madera, especialmente en las primeras etapas del secado.

Por esta razón se emplean los programas de secado que consisten en una secuencia de condiciones climáticas, temperatura y humedad relativa del aire, que se aplican durante etapas de secado presamente establecidas para una determinada especie.

El secado más adecuado y cauteloso es a base del contenido de humedad en la madera sin indicaciones del tiempo. Si se cuenta con datos suficientes sobre una carga específica de madera en una misma secadora, entonces se puede formular un programa basado en tiempos.

Todos los diagramas y horarios de secado encontrados en la literatura sólo sirven como guías generales y deben ser adaptados con eficiencia a cada secador.

Existe gran diversidad de programas de secado, a continuación mencionamos los más importantes.

- Programas de secado del Laboratorio de Investigación de Productos Forestales FPRL de Princess Risborough - Inglaterra.
- Programas de secado basados en el Gradiente de Secado.
- Programas de secado de la Junta del Acuerdo de Cartagena JUNAC. Tabla 2.19.

En el presente trabajo se utilizarán los programas recomendados por la JUNAC, los cuales se describen a continuación.

- Fuerte F para maderas latifoliadas de secado fácil.
- Moderado M para maderas latifoliadas de secado lento y/o propensas a deformaciones y agrietamientos.
- Suave S Para maderas latifoliadas de secado difícil.

Estos programas han sido adaptados con ciertas modificaciones, de los programas de secado elaborados por el FPRL de Inglaterra y según el estudio realizado del comportamiento al secado artificial de 105 maderas de la región Andina.

Si la carga contiene más de una especie, se debe elegir el programa para la especie de condiciones de secado más difíciles. Las especies que se secan más rápido deben retirarse antes, en caso contrario, se deberá realizar un largo período de acondicionamiento para que la humedad promedio de las especies no difiera en más de 3 a 4%.

Cuando se seca madera con un contenido de humedad menor al 30%, se regula las condiciones climáticas de la cámara a valores tales que introduzcan un contenido de humedad de equilibrio ligeramente superior al contenido de humedad de la superficie de la pieza, se mantienen estas condiciones por 12 a 24 horas y luego se reduce el ECH hasta el valor correspondiente a la etapa siguiente, y se continua el proceso hasta terminar el secado.

Para maderas de hasta 40 mm de espesor se aplica los programas directamente, para espesores entre 40 y 70 mm, la humedad relativa de cada fase se aumenta en un 5% y para espesores mayores el aumento es de 10%.

Tabla 2.19 Programas de secado de la JUNAC ⁵⁰

PROGRAMA DE SECADO	HUMEDAD DE LA MADERA (%)	TEMPERATURA (°C)		HUMEDAD RELATIVA APROX. (%)
		BULBO SECO	BULBO HÚMEDO	
FUERTE F	Verde	60	56	80
	60	65	58	70
	50	70	60	60
	40	75	61	50
	30	80	62	40
	20	80	60	35
MODERADO M	Verde	50	47	80
	60	55	49	70
	40	60	51	60
	30	65	52	50
	25	70	54	40
	20	70	50	35
SUAVE S	Verde	40	37	80
	40	40	35	70
	30	45	37	60
	25	50	40	50
	20	55	42	40
	15	55	37	30

⁵⁰ Junta del Acuerdo de Cartagena. (1989). Manual del Grupo Andino para el secado de maderas. Primera edición. pp. 4-35.

Tabla 2.20 Programas de secado de la JUNAC, recomendados para algunas especies de la subregión ANDINA⁵¹

NOMBRE CIENTÍFICO	NOMBRE COMÚN	PROGRAMA DE SECADO
<i>Anacardium excelsum</i>	CARACOLÍ, MIJAO	M
<i>Apeiba aspera</i>	MAQUIZAPA ÑAGCHA	F
<i>Aspidosperma macrocarpon</i>	PUMAQUIRO	M
<i>Bombacopsis quinata</i>	SAQUI SAQUI	F
<i>Brosimum alicastrum</i>	CHARO AMARILLO	M
<i>Brosimum uleanum</i>	MANCHINGA	M
<i>Brosimum utile</i>	PANGUANA, SANDE	F
<i>Calophyllum mariae</i>	ACEITE MARIO	S
<i>Camptosperma panamensis</i>	SAJO	M
<i>Carapa guianensis</i>	CARAPA, TANAGARÉ	S
<i>Cariniana domesticaca</i>	CACHIMBO	F
<i>Caryocar coccineum</i>	ALMENDRO	S
<i>Catostemma commune</i>	BARAMÁN	M
<i>Cedrela rosei blake</i>	CEDRO	M
<i>Cedreligna catenaeformis</i>	SEIQUE, TORNILLO	F
<i>Ceiba pentandra</i>	BONGA	M
<i>Ceiba samauma</i>	HUIMBA	S
<i>Cespedesia spathulata</i>	PACORA	S
<i>Chlorophora tinctoria</i>	MORAL FINO	M
<i>Chrysophyllum caimito</i>	CAIMITILLO	M
<i>Clarisia racemosa</i>	MORA	S
<i>Copaifera pubiflora</i>	ACEITE CABIMO	M
<i>Copaifera sp.</i>	CANIME	M
<i>Copaifera officinalis</i>	COPAIBA	F
<i>Cardia alliodora</i>	LAUREL	M
<i>Dialyanthera gracilipes</i>	CUANGARÉ	F
<i>Didymopanax morototoni</i>	SUN SUN	F
<i>Erisma uncinatum</i>	MUREILLO	F
<i>Eucalyptus globulus</i>	EUCALIPTO	S
<i>Huberodrendon patinoi</i>	CARRA	F
<i>Humiriastrum procerum</i>	CHANUL	S
<i>Hura crepitans</i>	CATAHUA AMARILLA	F
<i>Hymenaea courbaril</i>	ALGARROBO	M

⁵¹Junta del Acuerdo de Cartagena. (1989). Manual del Grupo Andino para el secado de maderas. Primera edición. pp. 4-36.

2.4. DEFECTOS DE SECADO

Todo daño en la estructura o alteración en la apariencia de la madera, producido durante el proceso de secado y que disminuye su valor comercial o su duración o afecta su aptitud industrial, se considera defecto de secado.¹⁰

Los defectos se presentan desde el momento en que ha sido cortado el árbol, ya sea en la troza, en la madera aserrada o, inclusive, en el producto terminado y en uso, cuando éste ha sido elaborado con madera verde o deficientemente tratado.

No es posible eliminar todos los defectos de secado, lo que sí es posible detectar las distintas manifestaciones según la causa y las circunstancias en las cuales se desarrollan. Si se sabe cómo, dónde y por qué ocurren, es posible tomar precauciones para que el deterioro sea el mínimo posible.

2.4.1. MANCHAS POR APILAR LA MADERA INADECUADAMENTE

Es muy importante apilar de la manera especificada la madera, tanto en intervalos de separación como las alturas de las torres, dependiendo siempre de la especie de madera, que además varían de acuerdo al grosor y polines⁵², para cuando la madera se encuentra verde o húmeda (Ver figura 2.40). La manera de evitar el defecto por apilado, es colocando de manera lineal los polines, es decir, que queden uno debajo de otro separados por las piezas de madera.

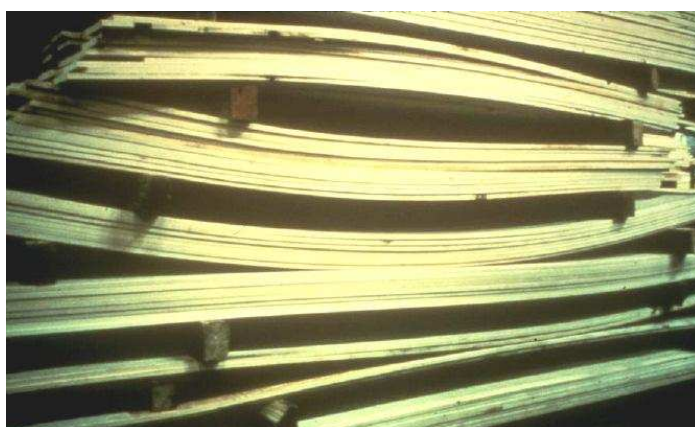


Figura 2. 40 Forma inadecuada de apilado de piezas de madera

⁵² Piezas de madera que sirven para almacenar y separa las piezas de madera húmeda o seca

La madera húmeda puede provocar que sufra cambios en las características propias de la especie por medio de las siguientes causas:

- Infección bacterial.
- Es frecuente en maderas duras, como en el pino.
- Alto contenido de humedad.
- Color oscuro.

El apilamiento de la madera no se lo debe realizar en forma cruzada, cuando la madera tiene un alto contenido de humedad.

2.4.2. CAMBIO DE COLOR

Este defecto tiene que ver con los extractivos químicos como resinas, gomas, taninos, colorantes, etc. Son propios de algunas especies, que causan descoloraciones de la madera.

Este problema se presenta en el secado artificial. Ocurre en varias maderas blandas o coníferas. Se cree que son causadas por los extractivos solubles en agua, los cuales reaccionan cuando se concentran y se depositan durante el secado, estos extractivos pueden ser azúcares y aminoácidos presentes en el agua libre. Imprimen una coloración marrón oscura, pero no afectan la resistencia mecánica.

Se pueden reducir aserrando y secando la madera tan pronto se corta el árbol y se asierra; evitando temperaturas por encima de 50°C durante el proceso y utilizando humedades relativas tan bajas como sean toleradas por la madera sin sufrir otros daños.

Otra causa que produce cambios de color, es el goteo de agua proveniente de piezas ferrosas encima de la madera, que ocasionan manchas de color negro-azulado. Por esta razón se prefiere que el techo falso sea de aluminio y este bien protegido contra la corrosión.

2.4.3. ATAQUE DE INSECTOS Y HONGOS

Los hongos son simples organismos que utilizan la madera como fuente de alimento. Se mueven a través de la madera como una red microscópica que crecen a través de los agujeros o directamente penetrando la pared celular de la madera.

Una vez que el hongo obtiene una suficiente cantidad de energía de la madera, produce un cuerpo fructífero sexual o asexual para distribuir las esporas reproductivas que pueden invadir otras maderas.

Los insectos poseen la capacidad de utilizar la madera para abrigo o alimento. Termitas, escarabajos, abejas, avispa, y las hormigas son las causas primarias de la mayoría de la destrucción en la madera.

El ataque del insecto es evidente generalmente desde túneles o cavidades en la madera, que contienen a menudo polvo o aserrín (heces del insecto) de madera. La presencia de polvo al pie de la madera o aserrín sobre la superficie de la madera, son muestras de un ataque.

Este tipo de defecto está presente en el secado artificial cuando la velocidad de flujo de aire es demasiado baja.

2.4.4. ALABEOS O DEFORMACIONES

Se originan en las diferencias de las contracciones longitudinal, radial y tangencial y se manifiestan, en una pieza de madera aserrada, mediante la curvatura de sus ejes longitudinales, transversales o ambos.

Las formas más comunes son:

2.4.4.1. ABARQUILLADO:

Es la distancia o curvatura del eje transversal de una pieza de madera aserrada. Aquellas tablas aserradas en sentido tangencial a los anillos, se deforman más que aquellas en sentido radial. Las cortadas en la periferia de las

trozas tienen menos distorsión que las obtenidas cerca a la médula. Entre mayor es el espesor, mayor es la tendencia al abarquillado. Si se hace un presecado al aire y se evitan los programas severos de secado, se puede reducir el abarquillado, pero la mejor forma de controlarlo es mediante un correcto apilado.

Figura 2.41

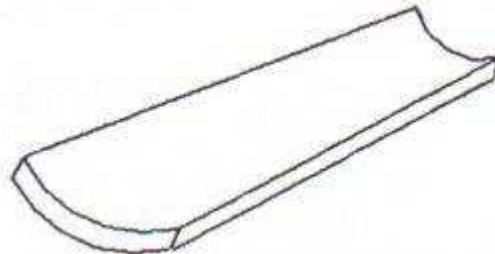


Figura 2. 41 Abarquillado

2.4.4.2. ARQUEADURA

Es el alabeo o curvatura a lo largo de la cara de la pieza. Se asocia con una contracción longitudinal excesiva en la madera cercana a la médula o juvenil, o madera de reacción, tanto por compresión en coníferas como de tracción en latifoliados formados cuando los árboles han crecido en pendientes o torcidos. También cuando en la pieza aserrada existe grano inclinado. Se puede controlar en forma semejante que el abarquillado. Figura 2.42

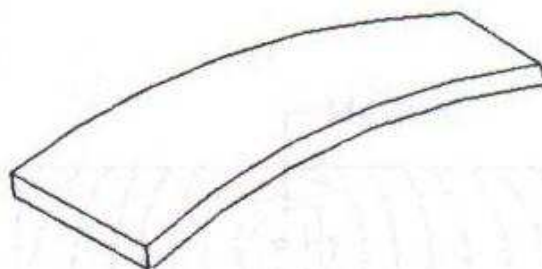


Figura 2. 42 Arqueadura

2.4.4.3. TORCEDURA

Es el alabeo que se presenta cuando las esquinas de la pieza de madera no se encuentran en el mismo plano. Se presenta en madera con grano espiralado, ondulado, entrecruzado, desviado o distorsionado por nudos. También

se puede reducir mediante un correcto apilado y una restricción mecánica durante el secado. Figura 2.43

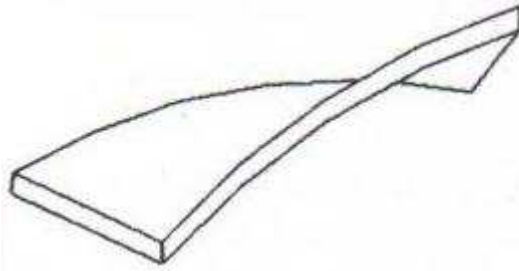


Figura 2. 43 Torcedura

2.4.5. RAJADURAS

Son separaciones de elementos de la madera que se extienden a lo largo del grano y afectan totalmente el espesor de la pieza, o dos puntos opuestos de una madera rolliza. Resultan como consecuencia de la extensión de grietas en los extremos. Si se evitan dichas grietas, se controlarán las rajaduras. La colocación de los listones separadores formando una superficie plana con los extremos de las tablas en las pilas de madera, evita una rápida desecación longitudinal y evita rajaduras. Figura 2.44

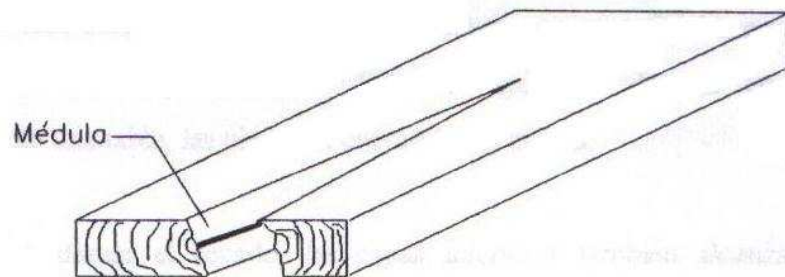


Figura 2. 44 Rajadura

La médula debe ser extraída de la pieza de madera, para evitar rajaduras.

2.4.6. ENDURECIMIENTO

La contracción normal de la madera, que se inicia cuando su superficie exterior ha alcanzado el punto de saturación de las fibras, no se desarrolla uniformemente en toda la pieza. Inicialmente y bajo condiciones de secado normales (gradiente de secado moderado), las capas exteriores pierden humedad rápidamente mientras que el centro permanece aún húmedo, creándose un gradiente de contenido de humedad que induce el flujo del agua del centro hacia la periferia.

Las capas interiores de la madera, que aún permanecen con un contenido de humedad superior al punto de saturación de las fibras, se oponen a la contracción generándose entonces esfuerzos de tensión hacia el centro.

Cuando la resistencia natural de la madera a la tensión y/o compresión es superior a las tensiones originadas por el gradiente del contenido de humedad, la madera se contrae normalmente sin presentarse daños en su estructura.

En caso contrario, si la resistencia natural de la madera es menor que las tensiones producidas, pueden desarrollarse agrietamientos superficiales que constituyen o reflejan un estado temprano de endurecimiento. Esta situación se detecta cuando al cortar longitudinalmente una tabla las piezas se curvan hacia fuera.

A medida que el secado avanza, las capas interiores de la pieza de madera progresivamente van alcanzando el punto de saturación de las fibras y empiezan también a contraerse. Cuando la parte central empieza a contraerse, son ahora las capas exteriores las que tratan de oponerse a esta acción, invirtiéndose los esfuerzos ya que la parte central estaría sometida a la tensión y la periferia a compresión.

Cuando el gradiente de contenido de humedad es muy elevado, la magnitud de los esfuerzos de compresión en las capas exteriores puede dar origen a la interrupción en la circulación del agua, situación que se evidencia

cuando después de varios días de secado, la humedad de la madera no disminuye debido a la formación de una capa muy seca que se constituye en una barrera para el avance del agua. Este fenómeno se conoce con el nombre de endurecimiento y se detecta cuando al cortar longitudinalmente una tabla, las piezas resultantes se curvan hacia adentro.

Este defecto se puede prevenir con un acondicionamiento adecuado; consiste en exponer la madera a altas temperaturas y elevada humedad relativa, para reducir el gradiente de humedad que existe entre sus capas internas y externas, de esta forma no se compromete con un daño permanente en la pieza de madera.

Para controlar el endurecimiento, se utiliza la prueba del tenedor, según la cual, un operador puede variar el programa de secado de acuerdo a los esfuerzos desarrollados en la pieza de madera, o comprobar si los procesos de acondicionamiento empleados para contrarrestar el endurecimiento son adecuados.

Las probetas de la figura 2.45, son tomadas de diferentes partes de una pila de madera, y deben cumplir con los siguientes requerimientos.

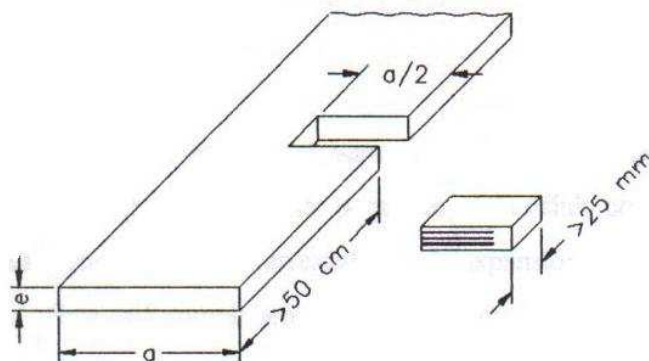


Figura 2. 45 Toma de probeta para la prueba del tenedor

El número de ranuras depende del espesor de la tabla y de la preferencia del operario. La dirección de los dientes nos indica el comportamiento de la madera. Ver figura 2.46

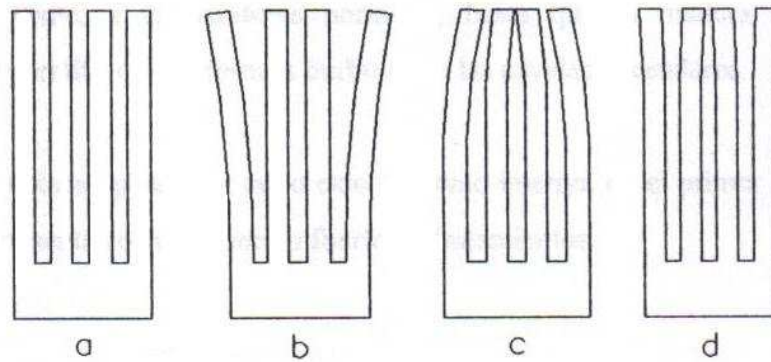


Figura 2. 46 Prueba del tenedor

- a. La madera se encuentra sin tensiones
- b. Las capas exteriores de la madera están más secas que las del centro de la pieza. Esta situación se considera normal en el Método del secado, y no es de importancia siempre y cuando la diferencia de humedad no sobrepase el 5% entre el centro y el exterior
- c. Madera endurecida o encostrada
- d. Madera endurecida, después del proceso de vaporización

2.4.7. TENSIONES DE SECADO DENTRO DE LA MADERA

La contracción que experimenta la madera al ser secada permite el desarrollo de esfuerzos mecánicos a través de su estructura. Estos esfuerzos son afectados por los cambios de humedad, las restricciones mecánicas, la anisotropía entre otros factores.

Durante el secado de la madera se producen tensiones de diferente naturaleza, según que su contenido de humedad se encuentre por encima o por debajo del punto de saturación de las fibras.

Por encima del punto de saturación de las fibras, la tensión capilar es la responsable de los esfuerzos presentes en la madera, en caso extremo puede llegar a un colapso, en el cual los esfuerzos de tensión capilar exceden la resistencia de la pieza a la compresión perpendicular al grano.

Las principales causas del colapso de la madera durante el secado son las siguientes:

- Madera de baja densidad que tiene paredes delgadas.
- Aplicación de temperaturas muy elevadas superiores a 50 o 60 °C durante las primeras etapas del secado, que disminuye la resistencia de la madera.
- Elevada tensión capilar.
- Alta tensión superficial del líquido evaporado de la madera.

Por debajo del punto de saturación de las fibras, las tensiones de secado responsables de la contracción normal de la madera, se desarrollan en las paredes celulares y son una consecuencia del gradiente de contenido de humedad presente entre las capas superficiales y el centro de la pieza de la madera.

2.4.8. COLAPSO CELULAR

- El colapso en la madera se presenta cuando los esfuerzos de la tensión capilar exceden la resistencia de la pieza a la compresión perpendicular al grano.
- El colapso celular es el resultado del secado rápido de madera en los hornos con un contenido de humedad tan alto que todas sus cavidades están llenas de Agua Libre, sin aire que sirve de colchón a la transmisión de esfuerzos en el secado.

Causas del Colapso en la Madera:

- Maderas muy impermeables que tienen sus cadenas celulares completamente llenas de agua.
- Maderas de baja densidad, que tienen paredes delgadas y poca resistencia a la compresión perpendicular al grano.
- Aplicación de temperaturas muy elevadas en los hornos de secado de madera durante las primeras etapas del secado, lo cual disminuye la resistencia de la madera y la hace más susceptible al colapso.

- El Colapso puede ser externo ver figura 2.47, en cuyo caso la superficie de la pieza presenta corrugaciones o fuertes aplastamientos.
- Cuando el colapso es interno, generalmente se manifiesta con agrietamientos en el corte transversal de la pieza.
- El colapso puede evitarse secando la madera en estado verde, a temperaturas normales y gradiente bajo durante las primeras etapas del proceso hasta que la madera haya perdido suficiente agua libre, facilitando la formación de burbujas de aire que evitan o atenúan la transmisión de esfuerzos durante esta etapa en los hornos de secado. Ver figura2.48



Figura 2. 47 Piezas con colapso en Eucalyptus nitens



Figura 2. 48 Recuperación de colapso en Eucalyptus nitens

2.4.9.GRIETAS SUPERFICIALES

Ocurren en las caras de las tablas durante las primeras etapas del secado. Las causas más comunes del agrietamiento superficial son el rápido secado en

las primeras etapas del estacionamiento o la súbita aplicación de un severo aumento en el gradiente de secado, en las últimas etapas.

Frecuentemente los lados de las grietas se cierran en la superficie al final del proceso, cuando se invierten los esfuerzos y no son visibles en la superficie hasta que la tabla sea cepillada.

Además de las grietas sobre las caras y cantos, también se forman en los extremos (Ver figura 2.49). Estas se pueden controlar mediante la aplicación de sustancias protectoras con capacidad aislante.

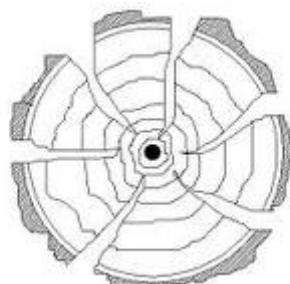


Figura 2. 49 Grietas exteriores dirigidas radialmente en la madera aserrada

2.4.10. AGRIETAMIENTO INTERNO

Los esfuerzos asociados con el endurecimiento y el colapso, cuando son severos, pueden producir en la madera grietas internas. En maderas propensas a este defecto, se forman cavidades en forma de media luna o panal que son percibidas o detectadas cuando la pieza es reaserrada. La madera que durante el secado desarrolla este tipo de grietas prácticamente no tiene uso.

Maderas de especies latifoliadas⁵³ y las alta densidad y con radios medulares pronunciados, tales como eucalipto (*Eucalyptus globulus*) y el algarrobo (*Hymenaea courbaril*) son muy propensas al agrietamiento interno.

⁵³ Se caracterizan por la presencia de vasos o poros. Su función es transportar agua y minerales desde la raíz hasta las hojas

Las grietas internas generalmente se atribuyen a un control incorrecto del proceso de secado y pueden evitarse por medio de la selección de un programa correcto de secado. Como son consecuencia de un endurecimiento superficial, éste debe ser detectado a tiempo y eliminarse. Una vez que las grietas se han formado ya no pueden eliminarse y en la mayoría de los casos la madera no puede usarse.

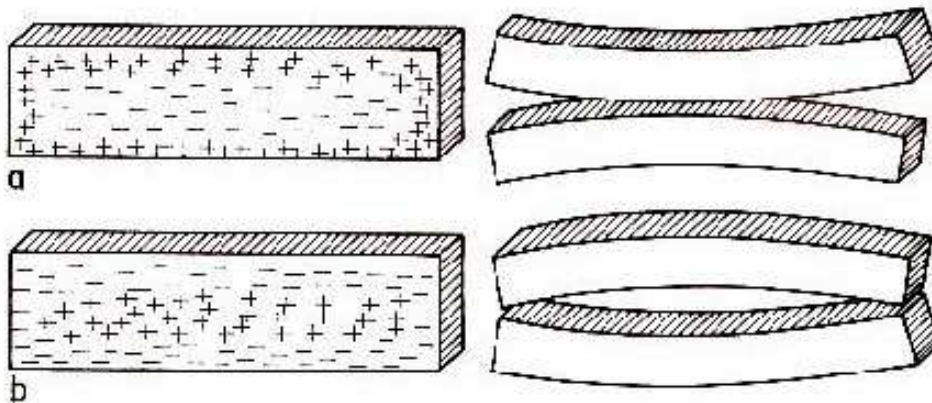


Figura 2. 50 Condición de esfuerzo durante el secado de la madera que conduce al defecto de endurecimiento⁵⁴

a = Al principio durante el secado (tensión (+) en las capas exteriores y compresión en el centro)

b = Endurecimiento (compresión (-) en las capas exteriores y tensiones en el centro) Figura 2.50.

2.5. SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

Para el Diseño del secador de madera fue necesario buscar algunas alternativas para luego poder tomar la decisión más óptima, fiable y rentable para el proceso de producción que se lleva a cabo en la empresa.

⁵⁴ web:http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-221X2005000200005&script=sci_arttext

A continuación se muestra una matriz de ponderación, en la que se evaluará ciertos parámetros técnicos, económicos y complementarios, los mismos que ayudarán a escoger la mejor opción para el diseño del secador de madera.

2.5.1. CÁMARA DEL SECADOR

Tabla 2.21 Matriz de ponderación para selección del tipo de cámara del secador ⁵⁵

ASPECTOS	PONDERACIÓN	ALTERNATIVAS	
		A	B
TÉCNICOS	40	37	34
Durabilidad	10	9	8
Versatilidad (Fácil Manejo)	10	10	8
Bajo nivel de contaminación	10	9	9
No contaminación a la producción	10	9	9
ECONÓMICOS	30	23	27
Costo de materiales	10	7	8
Costo de mantenimiento	10	8	9
Costo de instalación	5	4	5
Costo de mano de obra	5	4	5
COMPLEMENTARIOS	30	26	18
Seguridad	20	17	12
Funcionalidad	10	9	6
PUNTUACIÓN TOTAL	100	86	79

ALTERNATIVA A : Cámara de mampostería

ALTERNATIVA B : Cámara de aluminio

La cámara de mampostería es la opción que mejor ponderación tiene por tal motivo esta es la más adecuada para el secador.

⁵⁵ Fuente propia

2.5.2. SISTEMA DE CALEFACCIÓN

Tabla 2.22 Matriz de ponderación para selección del tipo de sistema de calefacción⁵⁶

ASPECTOS	PONDERACIÓN	ALTERNATIVAS	
		A	B
TÉCNICOS	30	29	23
Durabilidad	10	10	8
Versatilidad (Fácil Manejo)	10	10	8
Bajo nivel de contaminación	10	9	7
ECONÓMICOS	40	34	25
Costo de materiales	10	8	6
Costo de mantenimiento	10	10	7
Costo de instalación	10	8	6
Costo de mano de obra	10	8	6
COMPLEMENTARIOS	30	20	23
Seguridad	20	12	18
Funcionalidad	10	8	5
PUNTUACIÓN TOTAL	100	83	71

ALTERNATIVA A : el sistema de calefacción con mampostería

ALTERNATIVA B : el sistema de calefacción con caldero

El sistema de calefacción con mampostería es la opción que mejor ponderación tiene por tal motivo esta es la más adecuada para el secador.

⁵⁶ Fuente propia

2.5.3. TIPO DE COMBUSTIBLE

Tabla 2.23 Matriz de ponderación para selección de combustible⁵⁷

ASPECTOS	PONDERACIÓN	ALTERNATIVAS			
		A	B	C	D
TÉCNICOS	20	14	15	15	14
Poder calorífico	10	6	7	8	6
Nivel de contaminación	10	8	8	7	8
ECONÓMICOS	30	19	17	20	28
Costo de materiales (USD)	10	7	6	5	10
Costo de mantenimiento	10	6	6	8	9
Costo de instalación	10	6	5	7	9
COMPLEMENTARIOS	20	12	13	13	16
Seguridad	10	5	6	6	8
Funcionalidad	10	7	7	7	8
PUNTUACIÓN TOTAL	70	45	45	48	58

ALTERNATIVA A : gas

ALTERNATIVA B : energía eléctrica

ALTERNATIVA C : diesel

ALTERNATIVA D : desperdicios de madera

Tabla 2.24 Consumo de energía térmica para secar 1 kg de agua⁵⁸

Poder calorífico de los combustibles	
Diesel	42000 kj/kg
Bunker	40000 kj/kg
Gas liquido	46000 kj/kg
Leña	15000 kj/kg

⁵⁷ Fuente propia

⁵⁸ Corporación de desarrollo de para el sector forestal y maderero del Ecuador

El resultado de ponderación para elección de combustible es la madera, debido a que la cual nos facilita el mismo aserradero.

2.5.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El secador de madera se lo va a realizar con una cámara para secar de mampostería, para lo cual se deben tener en claro algunos aspectos importantes como cimentación y transferencia de calor los cuales se los va a analizar posteriormente en el diseño, además para el sistema de calefacción se va a utilizar una cámara de combustión de mampostería e intercambiador de calor el cual va a utilizar como combustible desperdicios de madera.

CAPITULO III

COMBUSTION DE LOS RESIDUOS DE MADERA

3.1. DEFINICIÓN

La combustión es una oxidación violenta, la cual, a su vez, desprende energía en forma de calor y luz. Los principales productos de ella son: el CO₂, el vapor de agua y la energía.

Esto se debe a que la madera está compuesta de una serie de sustancias, pero sobre todo de celulosa y lignina, ambos consistentes fundamentalmente en carbono, hidrógeno y oxígeno. Cuando se calienta una sustancia, recibe un aumento de energía y los movimientos de las moléculas se hacen más intensos. Estas moléculas entonces, son capaces de romperse con más facilidad y los átomos combinarse con otros, de oxígeno, formando nuevas sustancias, esto es, se produce combustión.

3.2. PODER CALORÍFICO DE LOS RESIDUOS DE MADERA

El poder calorífico de combustión, es la cantidad de energía que puede entregar los residuos de madera cuando son quemados totalmente. Se expresa en unidades de energía (J o kWh) por unidades de masa (kg).

Por cada kilogramo de residuos de madera que sean quemados, se generarán 3,34 kWh, mientras para igual cantidad de carbón, la cantidad de energía que se generará es más del doble que en comparación con los residuos de madera.

Finalmente, la cantidad de energía que genera un combustible dado, se podrá calcular a través de la relación entre la cantidad de combustible utilizado y su respectivo poder calorífico.

Tabla 3.1 Poder calorífico de residuos de madera⁵⁹

Biomasa	Poder calorífico (kWh/kg)
Residuos de madera (40% humedad)	3,34
Corteza(50% humedad)	2,9
Pellet (8% humedad)	5,23
Astillas (25% humedad)	5,18
Leña (25% humedad)	3,22

3.3. COMBUSTIÓN

Los procesos químicos en la combustión son iniciados generalmente por factores como calor, luz, y chispas. Cuando los materiales combustibles alcanzan la temperatura específica de ignición y la presión ambiental necesaria para ello, la reacción de combustión comienza. La combustión entonces se expande desde la fuente de ignición hacia las capas adyacentes de mezcla de gas; a su vez, cada punto de la capa ardiendo sirve como fuente de ignición para la siguiente capa adyacente, y así sucesivamente. La combustión es finalizada cuando el equilibrio se alcanza entre el total de energía calorífica de los reactivos y el total de energía calorífica de los productos.

En este momento, sería bueno que mencionara que además de los procesos químicos en la combustión, nos topamos con procesos de tipo físicos. En la combustión de tipo gaseosa, por ejemplo, la difusión de reactivos y los productos de la combustión, dependen en su concentración, presión y cambios de temperatura, así como la difusión de coeficientes.

Para que se produzca la combustión, se deben cumplir las siguientes condiciones:

- Debe haber combinación química, los productos finales una vez producida la combustión debe ser químicamente distintos a los productos iniciales.
- La combinación química debe producirse violenta e instantáneamente.
- Debe haber un desprendimiento de calor, se debe liberar cierta cantidad de calor.

⁵⁹ Fuente: Adaptado de IPCC, 2006.

- Suministrar la cantidad necesaria de oxidante, para asegurar una combustión completa, en el tiempo suficiente.
- También es necesario que la temperatura en algún punto de la mezcla de oxígeno y combustible, adquiera un determinado valor.
- Se necesita oxígeno, el cual se encuentra en el aire, el que desperdiciando los gases que se encuentran en pequeña proporción, está constituido por 23 % de oxígeno y 77% de nitrógeno.

Durante la combustión de la madera se realizan los siguientes procesos:

Deshidratación

Proceso en el cual la madera comienza a secarse debido a la transformación del agua en vapor.

Evaporación

La temperatura se eleva rápidamente, y la humedad tiende a cero, ocasionando cambios en la estructura molecular de los compuestos orgánicos provocando la pirolisis o descomposición térmica, que a su vez existe una emisión de gases desde las partículas de madera, para mezclarse con el oxígeno del aire originando la oxido-reducción.

3.4. REACCIONES DE COMBUSTIÓN

Elementos constituyentes de la madera (Combustible que se utilizará en el secador)

Tabla 3.2 Composición másica de la madera al 15% de humedad ⁶⁰

ELEMENTO	ASERRÍN (%)	CORTEZA (%)
Carbono	48-55	
Oxígeno	38-43	
Hidrogeno	06-07	
Nitrógeno	0-0,6	
Azufre	0,02-0,06	
Ceniza	0,1-2	0,5-5

3.4.1. REACCIÓN ESTEQUIOMÉTRICA

Es la relación de combustión en la que se utiliza la mínima cantidad de aire, 100% teórico, para oxidar a todos los elementos del combustible.

Con los datos presentados en la tabla anterior, podemos obtener la composición en masa de cada componente de la madera con los valores medios respectivamente y referidos a 100 Kg de combustible así:

Carbono:

$$\frac{51.5 \text{ kg C}}{100 \text{ kg de combustible}} * \frac{1 \text{ kg mol C}}{12 \text{ kg C}} = \frac{4.292 \text{ kg mol C}}{100 \text{ kg combustible}}$$

Oxígeno:

$$\frac{40.5 \text{ kg O}_2}{100 \text{ kg de combustible}} * \frac{1 \text{ kg mol O}_2}{32 \text{ kg O}_2} = \frac{1.266 \text{ kg mol O}_2}{100 \text{ kg combustible}}$$

Hidrógeno:

$$\frac{6.5 \text{ kg H}_2}{100 \text{ kg de combustible}} * \frac{1 \text{ kg mol H}_2}{2 \text{ kg H}_2} = \frac{3.25 \text{ kg mol H}_2}{100 \text{ kg combustible}}$$

⁶⁰ Bermúdez José y Cervantes Edwin. (1995). Diseño y Construcción de una Cámara de Combustión Utilizando Aserrín como combustible. Tesis, E.P.N. Quito. pp. 20.

Nitrógeno

$$\frac{0.3 \text{ kg } N_2}{100 \text{ kg de combustible}} * \frac{1 \text{ kg mol } N_2}{28 \text{ kg } N_2} = \frac{0.011 \text{ kg mol } N_2}{100 \text{ kg combustible}}$$

Azufre

$$\frac{0.04 \text{ kg } S}{100 \text{ kg de combustible}} * \frac{1 \text{ kg mol } S}{32 \text{ kg } S} = \frac{0.001 \text{ kg mol } S}{100 \text{ kg combustible}}$$

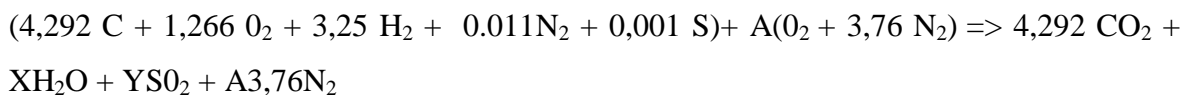
Ceniza

Para el cálculo de la ceniza, no se considera debido a que es un componente que no se oxida.

Para la reacción utilizamos los resultados anteriores y adicionamos aire, pero para esto tenemos que equilibrar la ecuación, entonces realizamos las siguientes anotaciones:

Reacción:

Combustible + Aire = Productos



Encontramos las variables A, X, Y balanceando la ecuación anterior de la siguiente manera:

Hidrógeno (H₂)

$$6,5 = 2X$$

$$X = 3,25$$

Oxígeno (O₂)

$$2,532 + 2A = 8,584 + 3,25 + 2Y$$

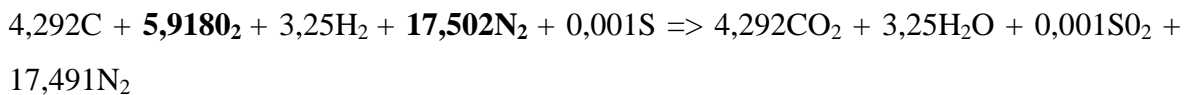
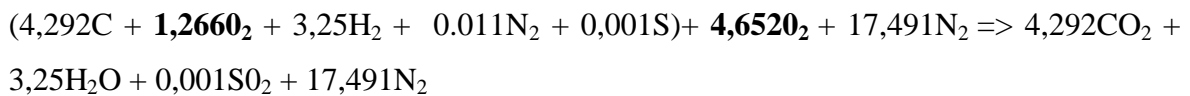
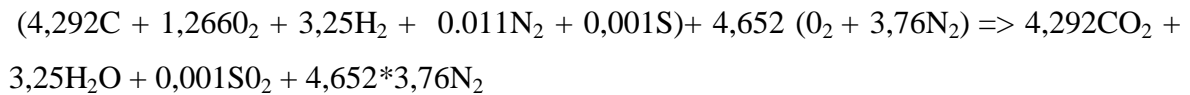
Azufre (S)

$$0,001 = Y$$

En la ecuación anterior reemplazamos Y para encontrar A y obtenemos:

$$A = 4,652$$

Reemplazando los valores encontrados tenemos:



3.4.2. REACCIÓN CON EXCESO DE AIRE

Cuando se realiza la combustión con la cantidad mínima teórica de aire, no se produce la oxidación completa de los elementos que constituyen el combustible, por lo tanto es necesario suministrar un porcentaje de exceso a la cantidad teórica.

El exceso de aire asegura que cada molécula del combustible tenga contacto directo con una o más moléculas de oxígeno en el tiempo del proceso de combustión, que en mayoría de veces es menor a un minuto desde que el combustible ingresa en la cámara.

El exceso de aire además ayuda al proceso físico de deshidratación y a la distribución adecuada del combustible.

Por otro lado, el exceso de aire disminuye la eficiencia del proceso porque se reduce la energía liberada del sistema y la temperatura de los gases de escape.

Los porcentajes de exceso de aire recomendados son:

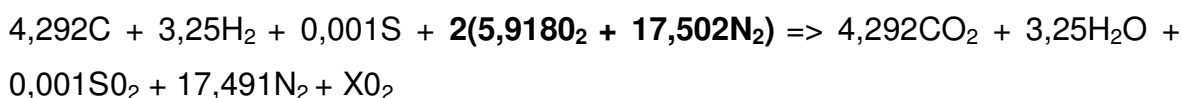
- Calderas: 25 a 100 %
- Calderas que utilizan madera como fuente de energía: 75 a 200%

En nuestro caso vamos a considerar el caso más extremo de exceso de aire del 200%.

De igual manera realizamos el balanceo pero considerando el 200% de aire.

Reacción:

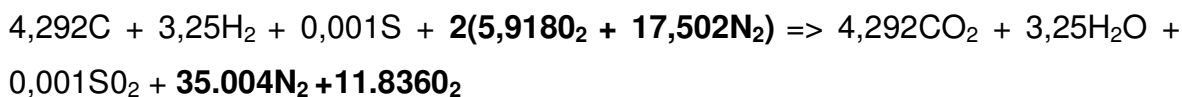
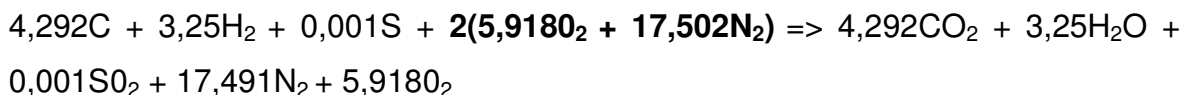
Combustible + Aire en exceso = Productos



Oxigeno (O₂)

$$23.672 = 8,584 + 3,25 + 0,002 + 2x$$
$$x = 5,918$$

Reemplazando x tenemos:



3.4.3. REACCIÓN CONSIDERANDO LA HUMEDAD DEL AIRE Y DEL COMBUSTIBLE

La madera que servirá de combustible, contiene un 15% de humedad promedio, que constituye los desperdicios de los trabajos realizados en madera previamente secada un porcentaje de 10 ó 12% de humedad.

El aire que se va a utilizar en la combustión también contiene cierta humedad, para nuestro caso en la Provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas tenemos las siguientes condiciones ambientales que son necesarias para realizar la reacción que se presenta más adelante:

Temperatura ambiente: 23°C

Humedad relativa : 91%

De la carta psicrométrica se obtiene:

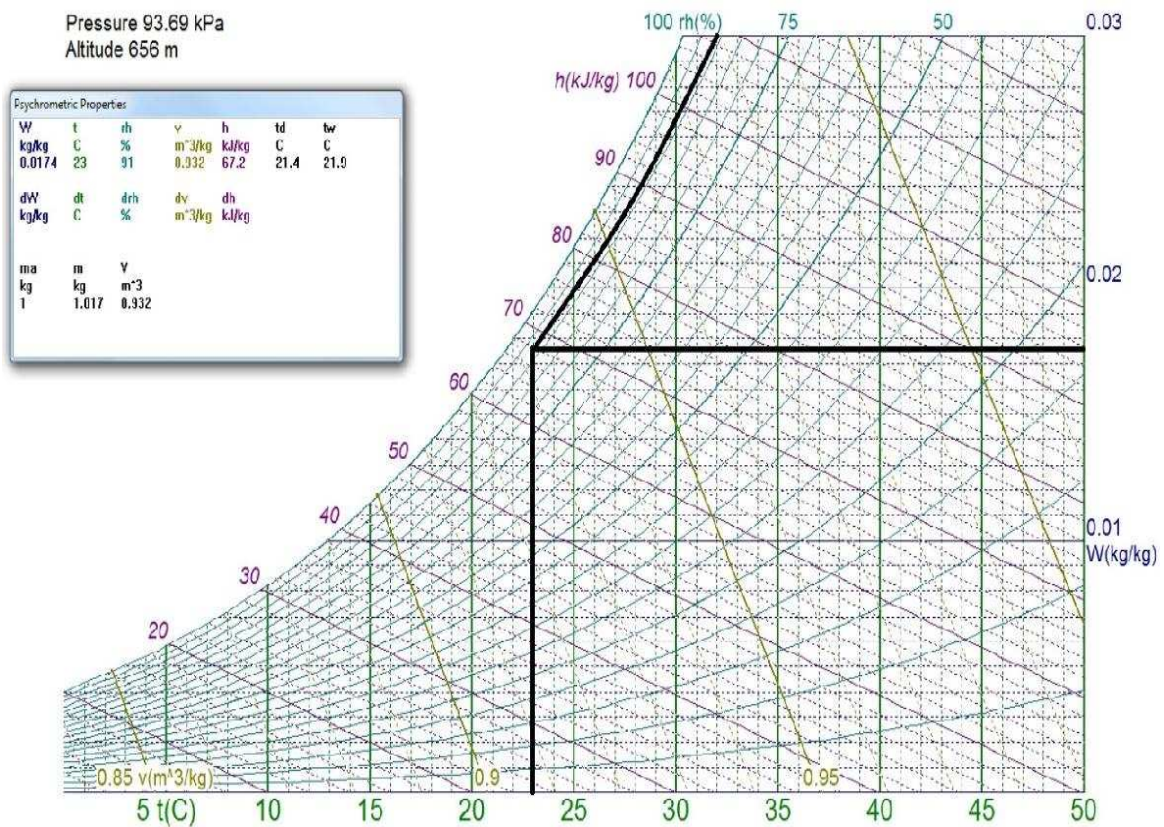


Figura 3. 1 Carta psicrométrica⁶¹, aplicable a una presión de 93.69 kPa

La relación de humedad absoluta a condiciones ambientales en Santo Domingo de los Tsáchilas es: **0.0174 kg de agua/kg de aire seco**

El número de moles de agua / número de moles de aire seco se expresa:

$$0.0174 \frac{\text{kg agua}}{\text{kg aire seco}} * \frac{28.96 \text{ aire seco}^{62}}{18 \text{ kg agua}} = 0.0279 \frac{\text{moles agua}}{\text{moles aire seco}}$$

Aire seco estequiométrico:

$$\begin{aligned} A (\text{O}_2 + 3,76\text{N}_2) &= 4,652(\text{O}_2 + 3,76\text{N}_2) \\ &= 9,304\text{O}_2 + 17,491\text{N}_2 \\ &= 26,795 \text{ (moles de aire seco)} \end{aligned}$$

⁶¹ WEB http://www.freownloadmanager.org/es/downloads/programa_de_psicometr%C3%ADa._gratis/

⁶² <http://foro.tiempo.com/constantes-de-interesdatos-t460.0.html>

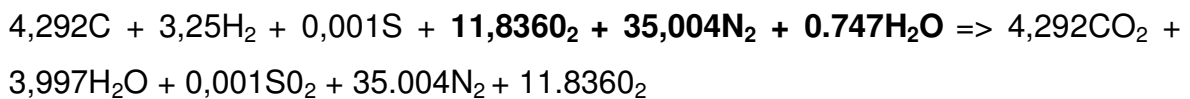
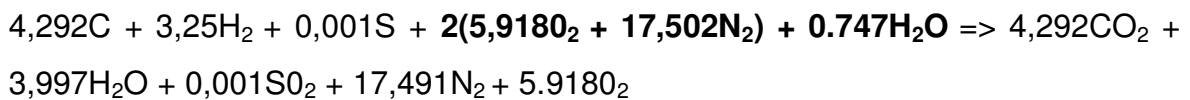
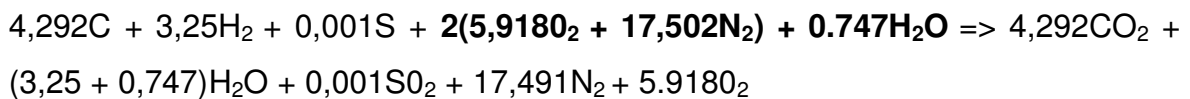
Con los datos obtenidos podemos determinar el número de moles de agua de la siguiente manera:

$$0.0279 \frac{\text{moles agua}}{\text{moles aire seco}} * 26.795 \text{ moles aire seco} = 0.747 \text{ moles de agua}$$

Finalmente adicionamos el número de moles de agua en la ecuación estequiométrica

Reacción:

Combustible húmedo + Aire húmedo = Productos



3.5. RELACIÓN AIRE – COMBUSTIBLE

Es la relación que existe entre el número de moles de aire y el número de moles de combustible presentes en la reacción de combustión.

$$\frac{A}{C} = \frac{n_{\text{aire}}}{n_{\text{comb}}} \quad \text{Ec. 3.1}$$

Dónde:

$\frac{A}{C}$ Es la relación aire-combustible

n_{aire} Es el número de moles de aire

n_{comb} Es el número de moles de combustible

3.5.1. RELACIÓN AIRE – COMBUSTIBLE PARA LA ECUACIÓN ESTEQUIOMETRICA

$$\begin{aligned} \left(\frac{A}{C}\right)_{Est} &= \frac{4.652 \text{ kg mol } O_2 + 17.491 \text{ kg mol } N_2}{100 \text{ kg combustible}} * \frac{28.96 \text{ kg aire}}{\text{kg mol aire}} \\ &= 6.412 \frac{\text{kg aire}}{\text{kg combustible}} \end{aligned}$$

3.5.2. RELACIÓN AIRE – COMBUSTIBLE PARA LA ECUACIÓN EXCESO DE AIRE⁶³

$$\left(\frac{A}{C}\right)_{Ea} = \left(1 + \frac{Ea}{100}\right) \left(\frac{A}{C}\right)_{Est} \quad \text{Ec. 3.2}$$

Exceso de aire al 200%: $2(5,918O_2 + 17,502N_2) = 93,68$

Reemplazando en Ec. 3.2 tenemos:

$$\left(\frac{A}{C}\right)_{Ea} = \left(1 + \frac{93.68}{100}\right) (6.412) \frac{\text{kg aire}}{\text{kg combustible}}$$

$$\left(\frac{A}{C}\right)_{E200\%} = \frac{12.418 \text{ kg aire}}{\text{kg combustible}}$$

3.5.3. TEMPERATURA ADIABATICA DE LLAMA

Es la máxima temperatura que pueden alcanzar los productos en el proceso de combustión, si este se realiza adiabáticamente y no existe trabajo ni cambio de energía cinética y potencial, es decir, no existen pérdidas de calor desde el sistema, $Q = 0$

En un proceso de combustión se tiene

$$Q = H_P - H_R \quad \text{Ec. 3.3}$$

⁶³ Bonilla, Isaac. Montenegro, Fernando. Diseño de un secador de madera. Tesis, ESPE. Quito.

$$H = \sum_{i=1}^n (\bar{h}_{T,P})_i \quad \text{Ec. 3.4}$$

$$(\bar{h}_{T,P})_i = (\bar{h}^\circ f_i)_{1 \text{ at}}^{298\text{K}} + \left(\bar{h}_{T,P} - \bar{h}_{1 \text{ at}}^{298\text{K}} \right)_{0 \text{ K}}^i$$

Q	kJ	Calor perdido desde el sistema
H _P	kJ	Entalpia total de los productos
H _R	kJ	Entalpia total de los reactivos
($\bar{h}_{T,P}$) _i	kJ	Entalpia del componente i, a una temperatura T y una presión P
($\bar{h}^\circ f_i$) _{1 at} ^{298K}	kJ	Entalpia de formación del componente i

Como Q = 0, entonces

$$H_P = H_R$$

Esta ecuación sirve para determinar la temperatura adiabática de llama, mediante proceso iterativo, como se indica a continuación.

Tanto el aire como el combustible (desperdicios de madera), ingresan al proceso de combustión a una temperatura ambiental de 23°C.

Tabla 3.3 Entalpia total de los reactivos H_R

REACTIVO	MOLES	($\bar{h}^\circ f_i$) _{1 at} ^{298K}	($\bar{h}_{T,P}$) _{0 K} ¹	($\bar{h}_{1 at}^{298K}$) _{0 K} ¹	($\bar{h}_{T,P}$) ₁
i	kgmol	kJ/kgmol	kJ/kgmol	K kJ/kgmol	kJ
C	4,292	0	6146,32	6187,8	-178,03
O ₂	11,836	0	8622,25	8682,0	-707,20
H ₂	3,25	0	8409,25	8468,0	-190,94
N ₂	35,004	0	8609,75	8669,0	-2073,99
H ₂ O	0,747	-241820	9835,75	9904,0	-180690,52
H _R (kJ)					-183840,68

Tabla 3.4 Entalpía total de los productos H_P para $T = 1000\text{ K}$

PRODUCTO	MOLES	$(\bar{h}^{\circ}_f)_j$ _{298K} 1 at	$(\bar{h}_{T,P})_j$ 0 K	$(\bar{h}_{298K})_j$ 1 at 0 K	$(\bar{h}_{T,P})_j$
I	kgmol	kJ/kgmol	kJ/kgmol	K kJ/kgmol	kJ
CO ₂	4,292	-393520	42769	9364	-1545613,58
H ₂ O	3,997	-241820	35882	9904	-862720,47
N ₂	35.004	0	30129	8669	751185.84
O ₂	11.836	0	31389	8682	268760.052
H_P (kJ)					-1388388.16

Tabla 3.5 Entalpía total de los productos H_P para diferentes temperaturas

Con $T=1500^{\circ}\text{K}$

PRODUCTO	MOLES	$(\bar{h}^{\circ}_f)_j$ _{298K} 1 at	$(\bar{h}_{T,P})_j$ 0 K	$(\bar{h}_{298K})_j$ 1 at 0 K	$(\bar{h}_{T,P})_j$
I	kgmol	kJ/kgmol	kJ/kgmol	K kJ/kgmol	kJ
CO ₂	4,292	-393520	71078	9364	-1424111,35
H ₂ O	3,997	-241820	57999	9904	-774318,83
N ₂	17,491	0	47073	8669	1344293,62
O ₂	5,918	0	49292	8682	480659,96
H_P (kJ)					-373476,60

Tabla 3.6 Entalpía total de los productos H_P para diferentes temperaturas

Con $T=1600^{\circ}\text{K}$

PRODUCTO	MOLES	$(\bar{h}^{\circ}_f)_j$ _{298K} 1 at	$(\bar{h}_{T,P})_j$ 0 K	$(\bar{h}_{298K})_j$ 1 at 0 K	$(\bar{h}_{T,P})_j$
I	kgmol	kJ/kgmol	kJ/kgmol	K kJ/kgmol	kJ
CO ₂	4,292	-393520	76944	9364	-1398934,48
H ₂ O	3,997	-241820	62748	9904	-755337,07
N ₂	17,491	0	50571	8669	1466737,61
O ₂	5,918	0	52961	8682	524086,24
H_P (kJ)					-163447,70

**Tabla 3.7 Entalpía total de los productos H_p para diferentes temperaturas
Con $T=1863^\circ\text{K}$**

PRODUCTO	MOLES	$(\bar{h}^{\circ}_f)_j$ _{298K} 1 at	$(\bar{h}_{T,P})_j$ 0 K	$(\bar{h}_{298K})_j$ 1 at	$(\bar{h}_{T,P})_j$
I	kgmol	kJ/kgmol	kJ/kgmol	K kJ/kgmol	kJ
CO ₂	4,292	-393520	76855,5	9364	-1399314,32
H ₂ O	3,997	-241820	62270	9904	-757247,64
N ₂	17,491	0	50220	8669	1454451,20
O ₂	5,918	0	52592,5	8682	519724,68
				H_p (kJ)	-182386,08

Para hornos industriales se considera que la temperatura real de combustión es de un 60% a 80% menor que la temperatura adiabática de llama, dependiendo de su diseño⁶⁴, y puede ser controlada por la cantidad de exceso de aire que se utilice en el proceso de combustión.

Los resultados obtenidos en la Tabla 3.7 para una reacción de combustión con 200% de exceso de aire y considerando la humedad tanto del ambiente como del combustible son:

Temperatura adiabática de llama **1590 °C**

Temperatura real de Combustión **954 °C**

3.6. PROPIEDADES DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN

Las propiedades de una mezcla de gases dependen de las propiedades de sus componentes, de su composición y de las condiciones de presión y temperatura a las que se encuentran expuestas, pero como la presión es lo suficientemente baja de tal manera que la mezcla tiende al estado de gas ideal, se considera que ésta no afecta las propiedades de la mezcla.

⁶⁴ Krivandin V. & Markov B. (1980). Metallurgical Furnaces. Primera Edición. Ed. Mir. pp 221.

3.6.1. PESO MOLECULAR

$$PM_{gc} = \sum_{i=1}^n x_i PM_i \quad \text{Ec. 3.5}$$

PM_{gc}	kg / kgmol	Peso molecular de la mezcla de gases
x_i		Fracción molar del componente i
PM_i	kg / kgmol	Peso molecular del componente i

Tabla 3.6 Peso molecular de la mezcla de gases PM_{gc} ⁶⁵

COMPONENTE i	FRACCIÓN MOLAR x_i	PESO MOLECULAR kg/kg mol	PESO MOLECULAR DE LA MEZCLA
CO ₂	0,078	44	3,43
H ₂ O	0,073	18	1,31
SO ₂	1,814E-05	64	0,00
N ₂	0,635	28	17,78
O ₂	0,215	32	6,87
GASES DE COMBUSTIÓN			29,38

3.6.2. DENSIDAD

$$\rho_{gc} = \frac{P PM_{gc}}{\bar{R} T} \quad \text{Ec.3.6}$$

ρ_{gc}	kg/m ³	Densidad de la mezcla
P	93690 Pa; 702.73 mm Hg	Presión atmosférica
PM_{gc}	29,38 kg/kgmol	Peso molecular de la mezcla
\bar{R}	8314,34 $\frac{\text{Pa m}^3}{\text{kg mol } ^\circ\text{K}}$	Constante universal de los gases
T	1227 K; 954 °C	Temperatura real de combustión

$$\rho_{gc} = 0.35 \text{ kg/m}^3$$

⁶⁵ Fuente propia

3.6.3. CALOR ESPECÍFICO CP_M

$$\overline{CP}_{gc} = \sum_{i=1}^n x_i \overline{CP}_i \quad \text{Ec. 3.7}$$

\overline{CP}_{gc}	J/(kgmol °C)	Calor específico de la mezcla de gases
x_i		Fracción molar del componente i
\overline{CP}_i	J/(kgmol °C)	Calor específico del componente i
CP_{gc}	J/(kg °C)	Calor específico de la mezcla de gases

Tabla 3.7 Calor específico de la mezcla de gases CP_{gc} ⁶⁶

COMPONENTE i	FRACCIÓN MOLAR x_i	CALOR ESPECÍFICO J/(kgmol °C)	CALOR ESPECÍFICO DE MEZCLA
CO2	0,078	56735,66	4417,00
H2O	0,073	43841,87	3178,59
SO2	1,814E-05	55402,70	1,00
N2	0,635	33831,32	21480,71
O2	0,215	35781,98	7682,12
CALOR ESPECÍFICO DE LOS GASES DE COMBUSTION			36759,44
			1251,17 J/(kg°C)

3.6.4. VISCOSIDAD

$$\gamma_{gc} = \frac{\mu_{gc}}{\rho_{gc}} \quad (\text{Referencia 66}) \quad \text{Ec. 3.8}$$

$$\mu_{gc} = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_i}{1 + \sum_{j=1, j \neq i}^n \phi_{ij} \left(\frac{x_j}{x_i}\right)} \quad \text{Ec. 3.9}$$

$$\phi_{ij} = \frac{\left(1 + \left[\frac{\mu_i}{\mu_j}\right]^{1/2} \left[\frac{PM_j}{PM_i}\right]^{1/4}\right)^2}{\sqrt{8 \left[1 + \frac{PM_i}{PM_j}\right]}} \quad \text{Ec. 3.10}$$

⁶⁶ Fuente propia

⁶⁷ R. Reid & T. Sherwood (1968). Propiedades de los gases y los líquidos. Primera Edición. México.

UTEHA. pp. 470

γ_{gc}	m/s ²	Viscosidad cinemática de la mezcla de gases
ρ_{gc}	0,27 kg/m ³	Densidad de la mezcla de gases
μ_{gc}	Pa s	Viscosidad dinámica o absoluta de la mezcla de gases
μ_i	Pa s	Viscosidad dinámica o absoluta del componente i
ϕ_{ij}		Coefficiente de difusión de la Teoría Cinética de Shuterland
x_i		Fracción molar del componente i
PM _i	kg/kgmol	Peso molecular del componente

Tabla 3.8 Viscosidad de la mezcla de los gases⁶⁸

Componente i	Viscosidad Pa s	Componente J	X _j	ϕ_{ij}	$\left(\frac{X_j}{X_i}\right)\phi_{ij}$	$1 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \phi_{ij} \left(\frac{x_j}{x_i}\right)$	μ_{gc}
CO ₂	3,37E-05	H ₂ O	0,073	0,6534	0,6085	9,098	3,70E-06
		N ₂	0,635	0,6924	5,6471		
		O ₂	0,215	0,6682	1,8428		
H ₂ O	2,97E-05	CO ₂	0,078	1,4072	1,5111	14,092	2,10E-06
		N ₂	0,635	1,0023	8,7778		
		O ₂	0,215	0,9466	2,8030		
N ₂	4,57E-05	CO ₂	0,078	1,4558	0,1785	1,610	2,80E-05
		H ₂ O	0,073	0,9786	0,1117		
		O ₂	0,215	0,9471	0,3202		
O ₂	5,64E-05	CO ₂	0,078	1,5691	0,5690	5,046	1,14E-05
		H ₂ O	0,073	1,0321	0,3485		
		N ₂	0,635	1,0577	3,1280		
Viscosidad Dinámica de la Mezcla (Pa s)							4,52E-05
Viscosidad Cinemática de la Mezcla (m ² /s)							1,30E-04

⁶⁸ Fuente propia

3.6.5. CONDUCTIVIDAD TERMICA

$$k_{gc} = \sum_{i=1}^n \frac{k_i}{1 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n A_{ij} \left(\frac{x_j}{x_i}\right)} \quad (\text{Referencia 68}) \quad \text{Ec. 3.11}$$

- k_{gc} $\frac{W}{m \text{ } ^\circ C}$ Conductividad térmica de la mezcla de gases
 k_i $\frac{W}{m \text{ } ^\circ C}$ Conductividad térmica del componente i
 $A_{ij} = 1.065 \times \phi_{ij}$ Coeficiente de difusión.

Tabla 3.9 Conductividad térmica de la mezcla de gases K_{gc} ⁷⁰

Componente i	k_i W/(m °C)	Componente J	ϕ_{ij}	Aij	X j	$A_{ij} \left(\frac{x_j}{x_i}\right)$	$1 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n A_{ij} \left(\frac{x_j}{x_i}\right)$	k_{gc}
CO2	5,51E-02	H2O	0,6534	0,6959	0,073	0,6480	5,6344	9,77E-03
		N2	0,6924	0,7374	0,635	3,0051		
		O2	0,6682	0,7116	0,215	0,9812		
H2O	6,37E-02	CO2	1,4072	1,4987	0,078	1,6093	8,7731	7,26E-03
		N2	1,0023	1,0674	0,635	4,6712		
		O2	0,9466	1,0081	0,215	1,4926		
N2	7,87E-02	CO2	1,4558	1,5504	0,078	0,3804	1,9599	3,93E-02
		H2O	0,9786	1,0422	0,073	0,2382		
		O2	0,9471	1,0087	0,215	0,3413		
O2	8,48E-02	CO2	1,5691	1,6711	0,078	1,2120	6,2836	1,32E-02
		H2O	1,0321	1,0992	0,073	0,7424		
		N2	1,0577	1,1265	0,635	3,3293		
Conductividad térmica de la mezcla W/(m °C)								6,96E-02

⁶⁹ R. Reid & T. Sherwood. (1968). Propiedades de los gases y los líquidos. Primera Edición. México. UTEHA. pp. 541

⁷⁰ Fuente propia

3.6.6. NUMERO DE PRANDTL

$$PR_{gc} = \frac{CP_{gc} \mu_{gc}}{k_{gc}} \quad (\text{Referencia 70}) \quad \text{Ec. 3.12}$$

PR_{gc}		Numero de prandtl de la mezcla de gases
CP_{gc}	$\frac{J}{kg \text{ } ^\circ C}$	Calor especifico de la mezcla de gases
μ_{gc}	Pa s	Viscosidad dinámica o absoluta de la mezcla de gases
k_{gc}	$\frac{W}{m \text{ } ^\circ C}$	Conductividad térmica de la mezcla de gases

$$PR_{gc} = 0,812$$

3.6.7. CAUDAL MASICO

La cantidad de aire que se necesita suministrar con el ventilador, obtenemos con la relación Aire /Combustible al 200%, obtenida anteriormente.

$$m_{aire_{vent}} = \dot{m}_c * \left(\frac{A}{C}\right)_{200\%} \quad \text{Ec. 3.13}$$

$$Caudal = \frac{m_{aire_{vent}}}{\rho_{aire}} \quad \text{Ec. 3.14}$$

$\dot{m}_c = 0.05 \quad \text{kg/s}$ Consumo de combustible (Referencia 72)

Considerando la referencia 72, toman el valor de 0,05 kg/s, y de acuerdo a la investigación de campo en la empresa Balplan de Santo Domingo de los Tsáchilas tienen el valor de 0,05 kg/s, el cual refleja que este valor de 0,05 es correcto para el consumo de combustible. Nosotros como criterio consideramos el consumo combustible de 0,05 kg/s.

⁷¹ Incropera, Frank P. De Witt, David P. Incropera. Fundamentos de Transferencia de calor. Cuarta edición. Prentice Hall. Copyright.1996 pp.320

⁷² Bonilla, Isaac. Montenegro, Fernando. Diseño de un secador de madera. Tesis, ESPE. Quito.

$\left(\frac{A}{C}\right)_{200\%}$	= 12.418	kg.aire/kg.comb	Relación Aire Combustible
$m_{aire_{vent}}$	= 0.62	kg.aire/s	Caudal másico de aire
ρ_{aire}	= 1.067	kg/m ³	Densidad del aire @ Tamb
Caudal	= 0.58	m ³ /s	Caudal necesario para el ventilador

3.6.8. MASA DE GASES DE COMBUSTIÓN POR UNIDAD DE TIEMPO

Determinamos de acuerdo a los resultados obtenidos en 3.4.2

$$m_{gc} = \frac{4.292 \text{kgmol } CO_2 + 3.997 H_2O + 0.001 SO_2 + 17.491 N_2 + 5.918 O_2}{100 \text{kg combustible}}$$

$$m_{gc} = \frac{31.699 \text{ kg mol}}{100 \text{kg combustible}} * PM_{gc}$$

$$m_{gc} = \frac{31.699 \text{ kg mol}}{100 \text{kg combustible}} * \frac{29.65 \text{kg}}{\text{kg mol}} = \frac{9.39 \text{ kg}}{\text{kg combustible}}$$

$$m_{gc} = \frac{9.39 \text{ kg}}{\text{kg combustible}} * \frac{0.05 \text{ kg combustible}}{\text{s}} = 0.46 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

PM_{gc}	kg/kgmol	Peso molecular de la mezcla obtenida anteriormente
m_{gc}	kg/kg	Masa de los gases de combustión combustible
\dot{m}_{gc}	kg/s	Caudal másico de los gases de combustión

3.6.9. SELECCION DEL VENTILADOR Y QUEMADOR PARA LA CAMARA DE COMBUSTION

Es necesario determinar el caudal para el ventilador, el cual es de 0,58 m³/s; 1230CFM. Teniendo en cuenta que éste debe superar las caídas de presión de los accesorios, del intercambiador de calor y la chimenea tomamos como caída de presión de 1 plg de H₂O. De acuerdo a estas consideraciones elegimos el ventilador que vamos a utilizar en la cámara de combustión, del catálogo EVISA VENTILADORES CATALOGO N°307⁷³

⁷³ WEB : <http://www.evisaventiladores.com/evisaweb/ventiladores/pdf/CATALOGOS/VCL-EJF-RP.pdf>

Tabla 3.10 Selección ventilador

TIPO	Centrífugo
MARCA	EVISA
MODELO	RP-125
CANTIDAD	1
CAUDAL(c/u)	1320 CFM
CAIDA DE PRESION	1 pulg H ₂ O
POTENCIA MOTOR	3 HP
VELOCIDAD DEL MOTOR	3500 RPM

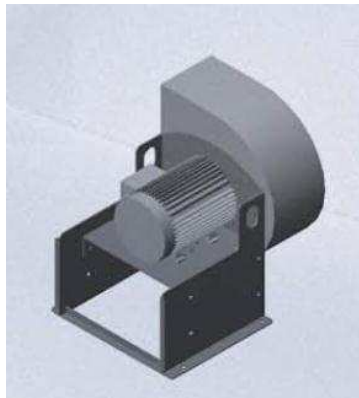


Figura 3. 2 Ventilador EVISA Centrífugo

El quemador seleccionado debe satisfacer la potencia del secador⁷⁴ Q=485 KW.

Tabla 3.11 Selección Quemador

COMBUSTIBLE	DIESEL
MARCA	ECOFLAM
MODELO	MAIOR P 45
CANTIDAD	1
POTENCIA TERMICA	532 KW
CAUDAL	45 kg/h
MOTOR	0,75 HP



Figura 3. 3 Quemador ECOFLAM ⁷⁵ modelo MAIOR P 45

⁷⁴ El cálculo de la potencia del secador se encuentra en el cálculo de la potencia. Pp.1 64

⁷⁵ WEB: [http://www.eurocombustion.com/docs/CATALOGO_2008_MAIOR_\(DIESEL\).pdf](http://www.eurocombustion.com/docs/CATALOGO_2008_MAIOR_(DIESEL).pdf)

CAPITULO IV

DISEÑO

4.1. PARAMETROS DE DISEÑO

Tabla 4.1 Parámetros de Diseño del Capítulo III

TEMPERATURA ADIABATICA DE LLAMA	
Temperatura adiabática de llama	1590 °C
Temperatura real de Combustión	954 °C
PROPIEDADES DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN	
Peso molecular	29,38 (kg/kgmol)
Densidad	0.35 (kg/m ³)
Calor específico	1251,17 [J/(kg °C)]
Viscosidad cinemática	1,30E-04 (m ² /s)
Conductividad térmica	6,96E-02 [W/(m °C)]
Numero de prandtl	0,812
SELECCIÓN DEL VENTILADOR PARA LA CAMARA DE COMBUSTION	
Tipo	Centrífugo
Marca	EVISA
Modelo	RP-125
Cantidad	1
Caudal	1320 CFM
Caída de presión	1 pulg H ₂ O
Potencia motor	3 HP
SELECCIÓN DEL QUEMADOR PARA LA CAMARA DE COMBUSTION	
Tipo	Diesel
Marca	ECOFLAM
Modelo	MAIOR P 45
Potencia térmica	532 KW
Caudal	45 kg/h

4.1.1. MADERAS A SECAR

- Bálsamo Caoba
- Cedro Chanul
- Eucalipto Colorado
- Guayacán Laurel

4.1.2. DIMENSIONES DE LA MADERA A SECAR

DIMENSIONES DE LA MADERA MÁS REPRESENTATIVA

OPCION 1

$L_{tab} = 2.5$	m	Longitud del tablón
$A_{tab} = 0.28$	m	Ancho del tablón
$E_{tab} = 0.05$	m	Espesor del tablón

OPCION 2

$L_{tab2} = 2.5$	m	Longitud del tablón
$A_{tab2} = 0.25$	m	Ancho del tablón
$E_{tab} = 0.025$	m	Espesor del tablón

4.1.3. DIMENSIONES INTERIORES DE LA CAMARA DE SECADO

LONGITUD DE LA CAMARA (OPCION 1)

$a = 0.5$ Espacio para la circulación del personal en la apilación de la madera

$$L_{camara} = (2 L_{tab}) + 3a \quad \text{Ec. 4 .1}$$

$L_{camara} = 6.5$ m Longitud interior del secador

$$L_{interior_camara} = 2L_{tab} + a \quad \text{Ec. 4.2}$$

$L_{interior_camara} = 5.5$ m Longitud total de madera

ANCHO DE LA CAMARA

$$\begin{aligned} E_{\text{lateral}} &= 0.75 && \text{m} && \text{Espacio entre la pila y la pared} \\ A_{\text{camara}} &= (2 E_{\text{lateral}}) + L_{\text{tab}} \\ A_{\text{camara}} &= 4 && \text{m} && \text{Ancho de la cámara} \quad \text{Ec. 4.3} \end{aligned}$$

ALTO DE LA CAMARA

$$\begin{aligned} n_{\text{filas}} &= 35 && && \text{Numero de filas a lo alto de la cámara} \\ E_{\text{separador}} &= 0.05 && \text{m} && \text{Espesor del separador} \\ \text{Alto}_{\text{pila}} &= n_{\text{filas}} * E_{\text{tab}} + n_{\text{filas}} * E_{\text{separador}} && && \text{Ec. 4.4} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Alto}_{\text{pila}} &= 3.5 && \text{m} \\ \text{Alto}_{\text{techofalso}} &= 1.5 && \text{m} && \text{Alto del techo falso} \\ E_{\text{libre}} &= 0.5 && \text{m} && \text{Espacio entre el techo y la pila} \\ \text{Alto}_{\text{camara}} &= \text{Alto}_{\text{pila}} + \text{Alto}_{\text{techofalso}} + E_{\text{libre}} \\ \text{Alto}_{\text{camara}} &= 5.5 && \text{m} \end{aligned}$$

NUMERO DE FILAS PARA LA OPCION 2

$$n_{\text{filas2}} = \frac{\text{Alto}_{\text{pila}} - E_{\text{separador}}}{E_{\text{tab2}} + E_{\text{separador}}} \quad \text{Ec. 4.5}$$

$$n_{\text{filas2}} = 46 \text{ filas} \quad \text{Numero de filas opción 2}$$

Tabla 4.2 Características de la Madera a secar⁷⁶

	Longitud m	Ancho m	Espesor m	Numero de filas
Opción 1	2.5	0.28	0.05	35
Opción 2	2.5	0.25	0.025	46

⁷⁶ Fuente propia

4.1.4. DIMENSIONES DE LA CAMARA DE SECADO Y DE LA PILA DE MADERA

Tabla 4.3 Dimensiones cámara de secado y pila de madera⁷⁷

	Longitud m	Ancho m	Alto m
Cámara de Secado	6.5	4	5.5
Pila de madera	2.5	2.5	3

4.1.5. CARGA DE SECADO

La carga de secado está dada por 2 coches que contiene madera apilada con una longitud de 2,5 m.

Tabla 4.4 Cantidad de tablones por coche y por carga de secado

DIMENSION DE LOS TABLONES (m)	TABLONES POR COCHE	TOTAL POR CARGA DE SECADO
2,5 X 0,28 X 0,05	245	490
2,5 x 0,25 x 0,025	322	644

4.1.6. CAPACIDAD DEL SECADOR

Tabla 4.5 Capacidad del secador en m³ de madera

DIMENSION DE LOS TABLONES (m)	Volumen unitario (m ³)	Volumen Total (m ³)
2,5 X 0,28 X 0,05	0,0350	17,15
2,5 x 0,25 x 0,025	0,0156	10,06

De la tabla se observa que la capacidad máxima del secador es de 17.15 m³ de madera húmeda en un periodo de carga de 15 días, la cual corresponde a una carga de 490 tablones de 2,5 X 0,28 X 0,05 m.

⁷⁷ Fuente propia

4.2. CAMARA DE SECADO Y DE COMBUSTION

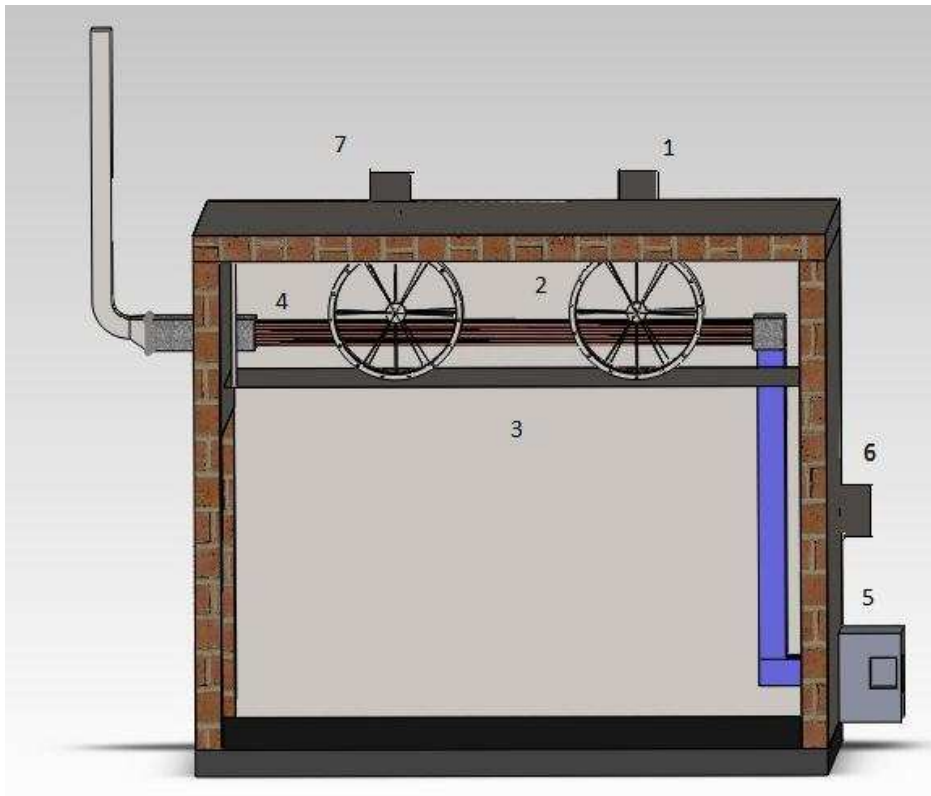


Figura 4. 1 Cámara de secado y cámara de combustión

- 1.- Cámara de secado
- 2.- Ventiladores Axiales
- 3.- Techo Falso
- 4.- Intercambiador de Calor
- 5.- Cámara de Combustión
- 6.- Sistema de control
- 7.- Ventilás

Tabla 4.6 Componentes de la cámara de secado y de combustión

COMPONENTES	LARGO (m)	ANCHO (m)	ALTURA (m)	ESPESOR (m)	MATERIAL
PAREDES	6,5 ; 1	4 ; 1	5,5 ; 1	0,30 ; 0.1	LADRILLO
TECHO	6,5 ; 1	4 ; 1	X	0,30 ; 0.1	BLOQUE (LOZA)
TECHO FALSO	6,5	2,5	X	0,002	ALUMINIO
PISO	6,5	4	X	0,30 ; 0.1	CONCRETO/PIEDRA MEZCLADA
PUERTA	X	4 ; 1	5,5 ; 1	0,01 ; 0.1	ACERO INOXIDABLE Y LANA DE VIDRIO

4.3. SISTEMA DE VENTILACION

Los ventiladores serán tipo axiales, e irán colocados sobre el techo falso, sujetos en la losa de la cámara de secado.

Este tipo de ventilador se utiliza en donde se requieren grandes caudales a baja presión, el consumo de energía es menor, que los de tipo radial, este tipo de ventiladores pueden tener una circulación en reverso del aire invirtiendo el sentido de giro.

4.3.1.DETERMINACION DEL CAUDAL

El caudal de aire depende de la velocidad de aire requerida y del área por la cual circula el aire a través de las pilas, a esta se la conoce como área libre⁷⁸.

$$\dot{v} = A_L \cdot \vartheta \quad \text{Ec. 4.6}$$

$$A_L = \frac{e_s}{e_s + e_m} L_1 h + a \quad \text{Ec. 4.7}$$

$$a = h (L_2 - L_1) \quad \text{Ec. 4.8}$$

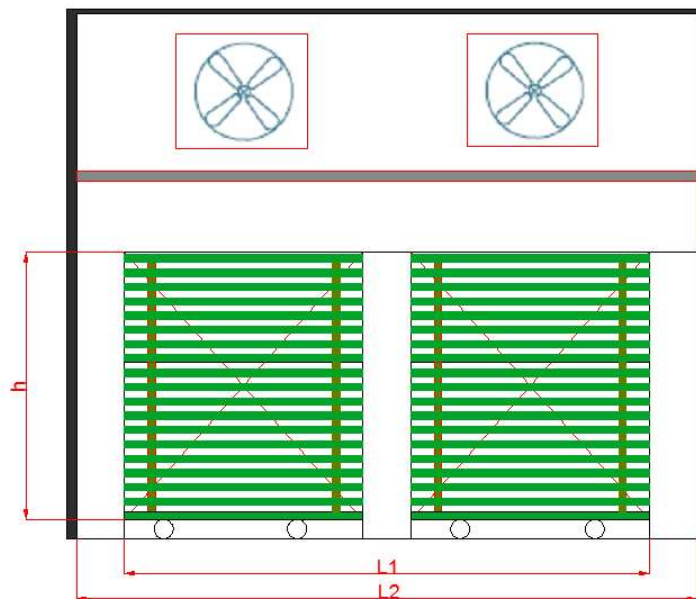


Figura 4. 2 Ubicación de ventiladores y pilas de madera en la cámara de secado

⁷⁸ Predafort-Secap. Secado de la madera II. Pag. 31

\dot{v}	m ³ /s; CFM	Caudal proporcionado por los ventiladores
A_L	m ²	Área libre
$\vartheta = 2$	m/s	Velocidad recomendada del aire
$e_s = 0.05$	m	Espesor de los separadores
$e_m = 0.05$	m	Espesor de la madera
$L_1 = 5.5$	m	Longitud total de madera
$h = 3.0$	m	Altura de la pila de madera
a	m ²	Área libre lateralmente
$L_2 = 6.5$	m	Longitud interior del secador

Tabla 4.7 Caudal de los ventiladores

DIMENSION DE LOS TABLONES (m)	AREA LIBRE m²	CAUDAL (m³/s)	CAUDAL (CFM)
2,5 X 0,28 X 0,05	13.13	21.35	45232.1
2,5 x 0,25 x 0,025	9.92	18.17	38494.9

De la tabla obtenida, el caudal necesario para operar el secador es de 21.35 m³/s; 45232.1 CFM.

4.3.2. CAIDAS DE PRESION A TRAVÉS DE LAS PILAS DE MADERA⁷⁹

La caída de presión del aire que circula al interior del secadero, depende básicamente de la distancia que debe circular a través de las pilas de madera.

$$\Delta P = \frac{\lambda b \vartheta^2 \rho_{aire}}{2 e_s} \quad \text{Ec. 4.9}$$

$$\rho_{aire} = 1.239 \left(\frac{288.13}{T_m + 273} \right) \left(\frac{P}{101325} \right) \quad \text{Ec. 4.10}$$

$$T_m = \frac{T_{ic} + T_f}{2} \quad \text{Ec. 4.11}$$

⁷⁹ Predafort-Secap. Secado de la madera II. Pag. 35

λ	=0.05	(0.02-0.08)	Factor de aspereza de la madera
b	=5.0	m	Ancho de las 2 pilas
ϑ	= 2	m/s	Velocidad del aire
ρ_{aire}	= 0.984	kg/m ³	Densidad del aire
e_s	=0.05	m	Espesor de los separadores
T_m	= 62.5	°C	Temperatura media del aire en el secador
T_{ic}	= 50	°C	Temperatura inicial de calentamiento
T_f	= 75	°C	Temperatura final
P	= 93690	Pa	Presión atmosférica en Santo domingo de los Tsáchilas
ΔP	= 96.4	Pa	Caída de presión o resistencia de las pilas de madera

4.3.3. SELECCION DE VENTILADORES

Para su selección necesitamos de la caída de presión a través de las pilas de madera y la caída de presión a través del intercambiador de calor⁸⁰, es decir tendremos una caída de presión de total de $96.4+39.45=135.85$ Pa (0.54 pulg H₂O); con un caudal de $21.35 \text{ m}^3/\text{s}$; 45232.1 CFM.

Usamos dos ventiladores es decir cada uno con un caudal de $11 \text{ m}^3/\text{s}$; 23305 CFM.

De acuerdo a estas consideraciones elegimos el ventilador que vamos a utilizar en la cámara de secado, del catálogo EVISA VENTILADORES CATALOGO N°6000⁸¹

⁸⁰ El cálculo de la caída de presión se encuentra en el Diseño del Intercambiador. Pp.1 71

⁸¹ WEB : <http://www.evisaventiladores.com/evisaweb/ventiladores/pdf/CATALOGOS/AXIALES.pdf>

Tabla 4.8 Característica del ventilador

-TIPO	- Axiales
-MARCA	- EVISA
-MODELO	- AF-6
-ARREGLO	- 22
CANTIDAD	- 2
-CAUDAL(c/u)	- 29056 CFM
-CAIDA DE PRESION	- 0.75 pulg H ₂ O
-POTENCIA MOTOR	- 3 HP
-VELOCIDAD DEL MOTOR	- 1750 RPM



Figura 4. 3 Ventilador axial evisa modelo AF-6 arreglo 22

Los ventiladores seleccionados, están diseñados para aplicaciones comerciales o industriales, donde se requiere grandes volúmenes de aire con caídas de presión relativamente bajas.

Para evitar que el motor sufra daños por la alta temperatura y humedad relativa presentes en la cámara de secado, se ha previsto que este sea totalmente cerrado y recubierto con un aislamiento tipo F, que soporta temperaturas de hasta 180 °C.

4.3.4. VENTILAS

Las ventilas serán colocadas en la parte superior de la cámara de secado, antes y después de los ventiladores, de tal manera que por las ventilas que se encuentran delante se expulsa aire cuando este se encuentra muy húmedo o la

cámara este demasiado caliente, y por la segunda se renueva el aire que se expulsó.

Durante el proceso de secado, las ventilas deben permitir una reposición de aproximadamente el 10 % del caudal⁸² de aire que proporcionan los ventiladores.

$${}^{83}A_V = \frac{\dot{v}_{AR}}{n_V \vartheta_{AR}} \quad \text{Ec. 4.12}$$

$$b_V = \sqrt{A_V} \quad \text{Ec. 4.13}$$

A_V	m^2	Área de la sección transversal de las ventilas
$\dot{v}_{AR} = 2.13$	m^3/s	Volumen de aire de reposición por unidad de tiempo
$n_V = 2$	c/u	Numero de ventilas de entrada y salida
$\vartheta_{AR} = 6$	m/s	Velocidad de aire
b_V	m	Dimensión de la ventilas

$$A_V = 0.17 \quad \text{m}^2$$

$$b_V = 0.45 \quad \text{m}$$

Las dimensiones de las ventilas tendrán una sección transversal de 45 x 45 cm y una altura de 30 cm.

En cada ventila aproximadamente a la mitad de su altura, se colocara un dámper manual que permitirá su control.

4.4. SISTEMA DE CALEFACCION

El sistema de calefacción es el que suministra la energía requerida por la madera para un acelerado proceso de secado.

⁸² Fuente propia

⁸³ Predafort-Secap. Secado de la madera II. Pag. 39

Para dimensionar el sistema de calefacción se deben considerar los factores más desfavorables, teniendo en cuenta también el consumo de energía térmica en la fase inicial de secado.

En la cámara se debe disminuir las pérdidas de calor por conducción y convección para lograr un ahorro de energía y por lo tanto ahorro en los costos de secado de la madera.

4.4.1. INTERCAMBIADOR DE CALOR

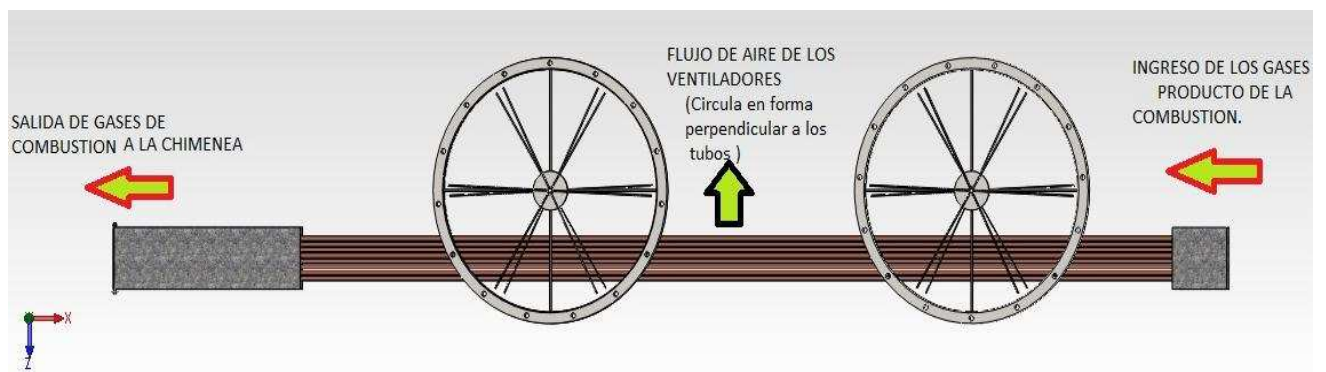


Figura 4. 4 Intercambiador de calor

El intercambiador de calor que se va a utilizar es de flujo cruzado, en el cual el fluido a calentarse (aire) circula en forma perpendicular a los tubos, por los cuales circula el fluido caliente (gases producto de la combustión de los desperdicios de madera).

El intercambiador se dimensiona de acuerdo al cálculo de la potencia.

4.4.1.1 CALCULO DE LA POTENCIA (Q)

- ✓ Debe permitir el calentamiento desde la temperatura ambiente (23°C) hasta la temperatura inicial de secado (50°C), en un tiempo de 3 a 8 horas (Arranque).

- Q_m (W) Potencia para calentar la madera
- Q_a (W) Potencia para calentar el agua que contiene la madera
- Q_{aire} (W) Potencia para calentar el aire

- Q_{arep} (W) Potencia para calentar el aire de reposición
 - Q_p (W) Potencia necesaria para las perdidas
 - Q_{ins} (W) Potencia necesaria para las instalaciones
- ✓ Debe permitir la evaporación del agua, desde la temperatura inicial (50 ° C) hasta la temperatura final (75 ° C cuando ya está seca la madera), en 120 horas (5 días), para la madera más crítica; esta es la de mayor rapidez de secado.
- Q_{ea} (W) Potencia para evaporar el agua

Considerando los dos casos obtenemos la potencia, y le añadimos un factor de seguridad⁸⁴, de acuerdo a la investigación⁸⁵ nosotros como criterio de diseño consideramos un factor del 30%, para nuestro diseño:

$$Q = (Q_m + Q_a + Q_{aire} + Q_{arep} + Q_p + Q_{ins} + Q_{ea})Fs \quad (W) \quad \text{Ec. 4.14}$$

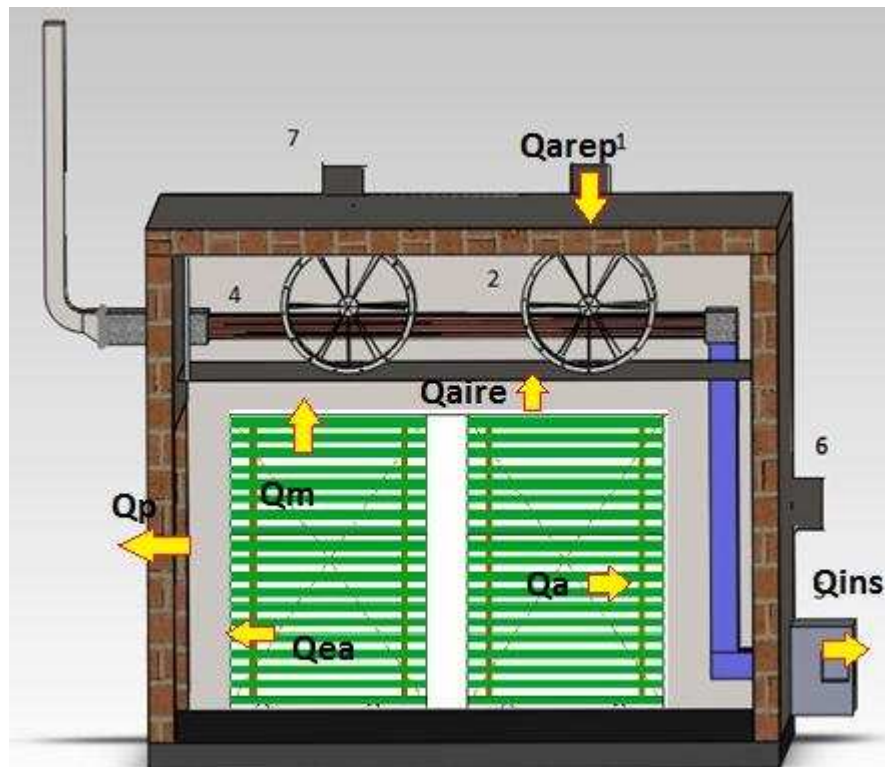


Figura 4. 5 Esquema de las cargas térmicas en el secador de madera (Q)

⁸⁴ Norton, R. L, Diseño de Máquinas, Prentice may, pp 548 .

⁸⁵ <http://www.mailxmail.com/curso-calculo-componentes-transmisiones-mecanicas/coeficiente-seguridad-admisible-1>

- Q (W) Potencia del secador de madera

4.4.1.1.1 POTENCIA PARA CALENTAR LA MADERA (Q_m)

Tabla 4.9. Densidad y contenido de humedad de la madera⁸⁶

MADERA	DENSIDAD (kg/m ³)		HUMEDAD (%)	
	ANHIDRA	BASICA	VERDE	FINAL
BALSAMO	930	810	67	10
CAOBA	520	480	90	10
CEDRO	460	380	74	10
CHANUL	830	660	80	10
COLORADO	910	760	63	10
EUCALIPTO	580-770	550	80	10
GUAYACAN	1026	950	57	10
LAUREL	540-640	440-520	122	10
PINO	470	390	80	10

La madera más densa es el GUAYACÁN, y por lo tanto se le tomara como base para los cálculos.

$$Q_m = \frac{m_m * C_{p_m} * (T_{is} - T_{amb})}{t} \quad \text{Ec. 4.15}$$

$$m_m = \rho_m * v_m \quad \text{Ec. 4.16}$$

ρ_m	= 950	$\frac{Kg}{m^3}$	Densidad de la madera
v_m	= 17.15	m^3	Volumen total de la madera
m_m	= 16290	kg	Masa de la madera
C_{p_m}	= 837.36	$\frac{J}{kg^\circ C}$	Calor específico de la madera
T_{is}	= 50	°C	Temperatura Inicial de secado
T_{amb}	= 23	°C	Temperatura ambiente

⁸⁶ <http://www.unalmed.edu.co/~lpforest/PDF/Guayac%E1n%20trebol.pdf>
www.chapingo.mx/dicifo/posgrado/.../ruiz_hernandez_marcos_2006.pdf
<http://www.unalmed.edu.co/~lpforest/PDF/Balsamo.pdf>

$t = 28800$ seg. Tiempo de calentamiento (8 horas)

$Q_m = 12970$ W **Potencia para calentar la madera**

4.4.1.1.2 POTENCIA PARA CALENTAR EL AGUA QUE CONTIENE LA MADERA (Q_a)

$$Q_a = \frac{m_a * C_{p_a} * (T_{is} - T_{amb})}{t} \quad \text{Ec. 4.17}$$

$$m_a = m_m * CH_v \quad \text{Ec. 4.18}$$

$m_a = 9287$ kg Masa de agua contenida en la madera

$m_m = 16290$ kg Masa de la madera

$CH_v = 57$ % Contenido de humedad de la madera en estado verde

$C_{p_a} = 4186.8$ $\frac{J}{kg^{\circ}C}$ Calor específico del agua

$t = 28800$ seg Tiempo de calentamiento (8 horas)

$Q_a = 36450$ W **Potencia para calentar el agua que contiene la madera**

4.4.1.1.3 POTENCIA PARA CALENTAR EL AIRE (Q_{aire})

Durante el periodo del arranque del secador, el aire será totalmente recirculado

$$Q_{aire} = \frac{m_{aire} * (h_2 - h_1)}{t} \quad \text{Ec. 4.19}$$

$$m_{aire} = \rho_{aire} * V_{aire} \quad \text{Ec. 4.20}$$

$$\rho_{aire} = \frac{1}{V_{especifico}} \quad \text{Ec. 4.21}$$

$$V_{\text{especifico}} = 0,9318 \frac{\text{m}^3}{\text{Kg}}$$

AIRE EN CONDICIONES INICIALES:

Ingresamos los siguientes datos:

Psicrometría		
Datos		
Unidades:	<input checked="" type="radio"/> SI	<input type="radio"/> Ing.
Parámetros	Valor	Unidad
Temperatura:	23	C
Temp. b. húmedo:	21.866899873	C
Humedad relativa:	91	%
Punto de rocío	21.464774655	C
Altitud SNM	656	m
<input type="button" value="Calcular"/>		
Resultados		
Presión Atmosférica	0.9369357968	bar
Pv sat	28.104347664	mbar
Pv	25.574956375	mbar
Humedad absoluta	0.0174548018	kg/kg
Entalpía	67.503183536	kJ/kg
Volumen específico	0.9317925606	m3/kg

Figura 4. 6 Aire en condiciones iniciales⁸⁷

⁸⁷ http://www.freownloadmanager.org/es/downloads/programa_de_psicometr%C3%ADa._gratis/

FIGURA 3
GRAFICO PSICROMETRICO
 ALTAS TEMPERATURAS
 PRESION 93,6 KPa

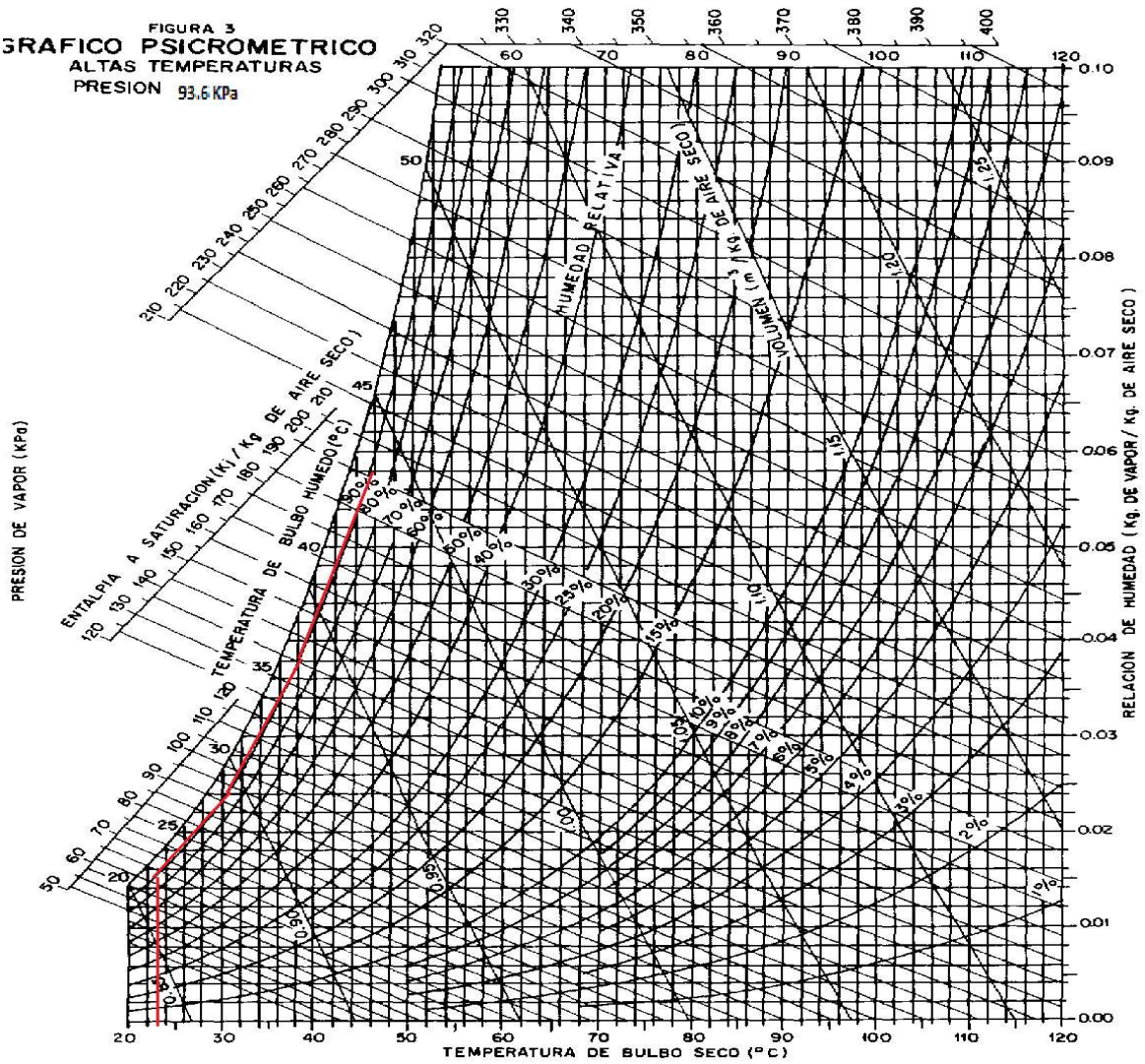


Figura 4. 7 Psicrometría Condiciones iniciales

Obteniendo así la entalpía inicial de aire húmedo:

$$h_1 = 67503 \text{ J/kg}$$

AIRE EN CONDICIONES FINALES

Ingresamos los siguientes datos:

Psicrometría		
Datos		
Unidades:	<input checked="" type="radio"/> SI	<input type="radio"/> Ing.
Parámetros	Valor	Unidad
Temperatura:	50	C
Temp. b. húmedo:	48	C
Humedad relativa:	89.567900376	%
Punto de rocío	47.778769470	C
Altitud SNM	656	m
<input type="button" value="Calcular"/>		
Resultados		
Presión Atmosférica	0.9369357968	bar
Pv sat	123.49824742	mbar
Pv	110.61478722	mbar
Humedad absoluta	0.0832635221	kg/kg
Entalpía	266.07301617	kJ/kg
Volumen específico	1.1212660868	m ³ /kg

Figura 4. 8 Aire en condiciones finales⁸⁸

El termómetro de bulbo seco mide 50 °C, simultáneamente el termómetro de bulbo húmedo mide 48 °C⁸⁹. El resultado es que la diferencia psicrométrica es 2 y por consiguiente la humedad del aire correspondiente es del 89,5 % HR. (Véase la figura 4.8)

⁸⁸ WEB

:http://www.freedownloadmanager.org/es/downloads/programa_de_psicometr%C3%ADa._gratis/

⁸⁹ Dato experimental proporcionado en la fábrica Balplan S.A Santo Domingo de los Tsáchilas.

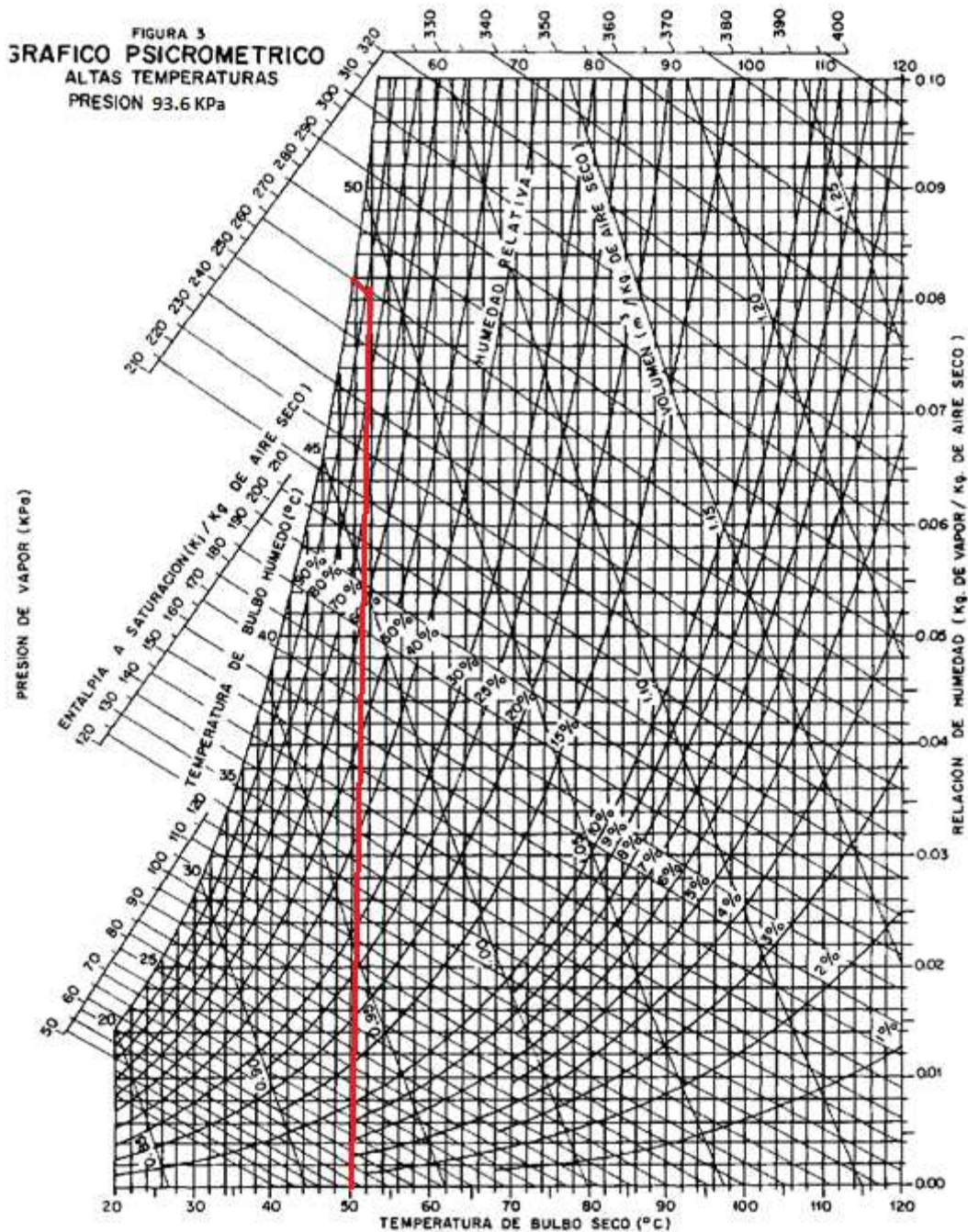


Figura 4. 9 Carta Psicométrica Condiciones Finales⁹⁰

Obteniendo así la entalpía final de aire húmedo:

$$h_2 = 266073 \text{ J/kg}$$

90

<http://www.google.com.ec/imgres?q=tabla+psicometrica+a+93,6+kpa&um=1&hl=es&sa=N&biw=1350&bih=712&tbm=isch&tbnid=KMYDGaTo7SFjFM:&imgrefurl=http://www.fao.org/docrep/X5027S/x5027S0n.htm&docid=Cz9oaYxuWJW2rM&imgurl=http://www.fao.org/docrep/X5027S/x5027SAE.GIF&w=2120&h=1675&ei=dNKXTveJLtS4tgePwq2ABA&zoom=1>

Dónde:

$V_{especifico} = 0.9318$	Volumen especifico	$\frac{m^3}{Kg}$
$\rho_{aire} = 1.073$	Densidad del aire	$\frac{Kg}{m^3}$
$V_{aire} = 125.85$	Volumen del aire	m^3
$m_{aire} = 135.04$	Masa del aire	kg
$h_2 = 266073$	Entalpía final del aire húmedo	$\frac{J}{kg}$
$h_1 = 67503$	Entalpía inicial del aire húmedo	$\frac{J}{kg}$
$t = 28800$	Tiempo de calentamiento (8 horas)	seg
$Q_{aire} = 1004.7$	Potencia para calentar el aire	W

4.4.1.1.4 POTENCIA PARA CALENTAR EL AIRE DE REPOSICION (Q_{arep})

El aire será recirculado en un 90%

$$Q_{arep} = \dot{m}_{arep} * C_{p_{aire}} * \Delta T \quad \text{Ec. 4.22}$$

$$\Delta T = T_{mr} - T_{amb} \quad \text{Ec. 4.23}$$

$$T_{mr} = \frac{T_{is} + T_f}{2} \quad \text{Ec. 4.24}$$

$$\dot{m}_{arep} = 0.1 * \dot{m}_{aire} \quad \text{Ec. 4.25}$$

$$\dot{m}_{aire} = \rho_{aire} * \dot{v}_{aire} \quad \text{Ec. 4.26}$$

Dónde:

$\dot{m}_{arep} = 2.3$	Kg/s	Caudal másico de aire de reposición (10% del caudal másico de aire) ⁹¹
------------------------	------	--

$C_{p_{aire}} = 1008$	J/kg °K	Calor especifico del aire @ $T_{mr} = 62.5 + 273 = 335.5^\circ K$
-----------------------	---------	--

⁹¹ Bonilla, Isaac. Montenegro, Fernando. Diseño de un secador de madera. Tesis, ESPE. Quito

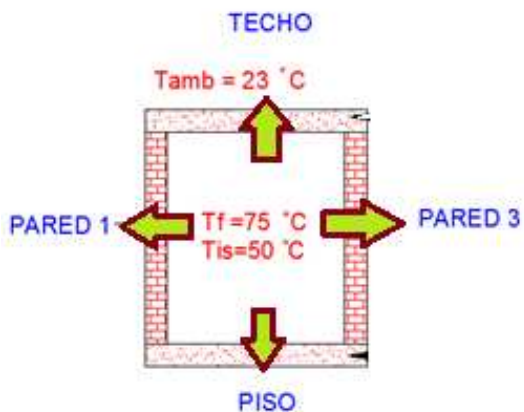
T_{mr}	= 62.5	°C	Temperatura media de aire de reposición
T_{is}	= 50	°C	Temperatura inicial de secado
T_f	= 75	°C	Temperatura final
ΔT	= 39.5	°C	Variación de temperatura
\dot{m}_{aire}	= 23	Kg/s	Caudal másico del aire
\dot{v}_{aire}	= 21.35	m ³ /s	Caudal de aire (obtenido al inicio)
ρ_{aire}	= 1.067	Kg/m ³	Densidad del aire
Q_{arep}	= 91577	W	Potencia para calentar el aire de reposición

4.4.1.1.5 POTENCIA NECESARIA PARA LAS PERDIDAS (Q_p)

4.4.1.1.5.1 PERDIDAS DE CALOR A TRAVÉS DE LA CAMARA

DE SECADO (Q_{p1})

VISTA FRONTAL



VISTA SUPERIOR

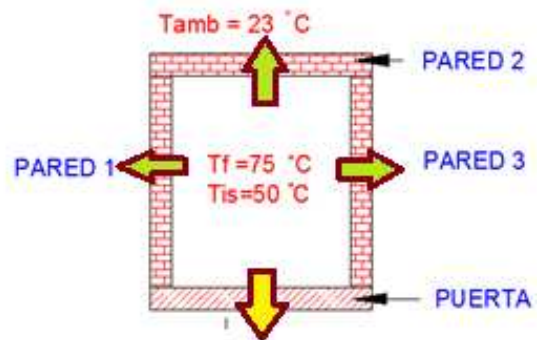


Figura 4. 10 Distribución de Temperaturas en la Cámara de secado con flujos de calor.

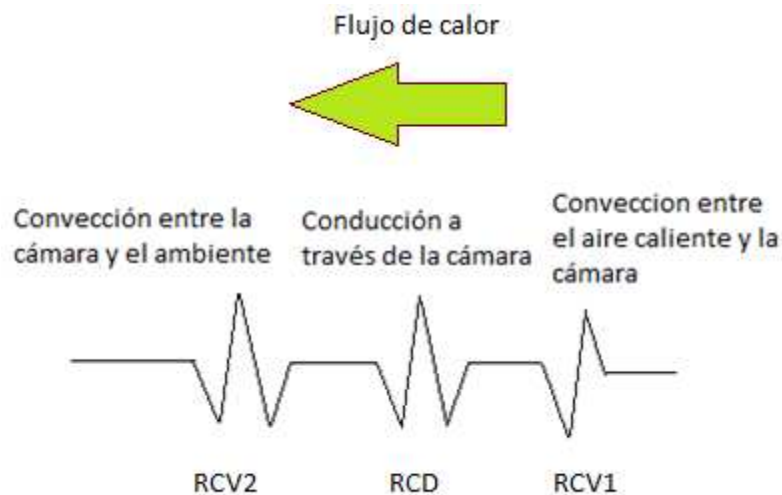


Figura 4. 11 Distribución de las Resistencias Térmicas

Tomando en cuenta que el flujo de energía que ingresa a la pared es igual al flujo de energía que sale de la pared⁹², utilizamos las siguientes fórmulas:

$$Qp_1 = \frac{T_f - T_{amb}}{R_{T1}} \quad \text{Ec. 4.27}$$

$$R_{T1} = R_{CV1} + R_{CD} + R_{CV2} \quad \text{Ec. 4.28}$$

$T_f = 75$	°C/W	Temperatura final
$T_{amb} = 23$	°C/W	Temperatura ambiente
R_{T1}	°C/W	Resistencia térmica total de la cámara de secado
R_{CV1}	°C/W	Resistencia térmica por convección entre el aire caliente y la pared de la cámara de secado
R_{CD}	°C/W	Resistencia térmica por conducción a través de la pared de la cámara de secado
R_{CV2}	°C /W	Resistencia térmica por convección libre entre la pared de la cámara de secado y el aire ambiente
Qp_1	W	Potencia de las pérdidas a través de la cámara de secado

⁹² Karlekar. B.V. Transferencia de calor. Pg.12

4.4.1.1.5.1.1 RESISTENCIA DE CONVECCION FORZADA POR EL FLUJO DEL AIRE CALIENTE A TRAVES DE LA CAMARA DE SECADO (R_{CV1})

Calculamos el número de Reynolds para determinar el tipo de flujo, ya sea laminar o turbulento⁹³.

Para flujo laminar Reynolds $< 5 \cdot 10^5$

Para flujo Turbulento Reynolds $> 5 \cdot 10^5$

$$Re_1 = \frac{v_1 \cdot Lc_1}{\nu_1} \quad \text{Ec. 4.29}$$

Re_1		Número de Reynolds
$v_1 = 2$	m/s	Velocidad del aire
Lc_1	m/s	Longitud característica
ν_1	m ² /s	Viscosidad cinemática

Nota: La longitud característica depende de la dirección del flujo del aire en el interior del secadero.

La viscosidad cinemática obtenemos de tablas @ $T_f = 75^\circ\text{C} + 273 = 348^\circ\text{K}$

Tabla 4.10 Tipo de flujo en la cámara de secado (Re_1)

Denominación	Pared 1 (6,5*5,5) m	Pared 2 (6,5*5,5) m	Pared 3 (5,5*4) m	Puerta (5,5*4) m	Techo (6,5*4) m	Piso (6,5*4) m
Velocidad (m/s)	2	2	2	2	2	2
Longitud característica (m)	5,5	5,5	5,5	5,5	6,5	6,5
Viscosidad cinemática (m ² /s)	2,07E-05	2,07E-05	2,07E-05	2,07E-05	2,07E-05	2,07E-05
Reynolds	530900	530900	530900	530900	627400	627400
Tipo de flujo	Turbulento	Turbulento	Turbulento	Turbulento	Turbulento	Turbulento

⁹³ Mills A.F. Transferencia de Calor. Pg. 293

Para el cálculo del número de Nusselt en una placa plana con flujo forzado, utilizamos las siguientes formulas⁹⁴:

$$Nu_1 = 0.67Re_1^{1/2}Pr_1^{1/3} \quad \text{Para flujo laminar } Re_1 < 5 \cdot 10^5 \quad \text{Ec. 4.30}$$

$$Nu_1 = 0.029Re_1^{0.8}Pr_1^{0.43} \quad \text{Para flujo Turbulento } Re_1 < 5 \cdot 10^5 \quad \text{Ec. 4.31}$$

Nu_1 Numero de Nusselt de la cámara de secado

Pr_1 Numero de Prandtl de la cámara de secado

El número de Prandtl obtenemos de Tablas @ $T_f = 75^\circ\text{C} + 273 = 348^\circ\text{K}$

Tabla 4.11. Calculo de nusselts en la cámara de secado (Nu_1)

Denominación	Pared 1 (6,5*5,5) m	Pared 2 (6,5*5,5) m	Pared 3 (5,5*4) m	Puerta (5,5*4) m	Techo (6,5*4) m	Piso (6,5*4) m
Prandtl	0,70028	0,70028	0,70028	0,70028	0,70028	0,70028
Nusselts	945,992	945,992	945,992	945,992	1081	1081

El coeficiente de Transferencia de calor por convección⁹⁵ obtenemos de la siguiente manera:

$$h_1 = \frac{Nu_1 \cdot k_1}{Lc_1} \quad \text{Ec. 4.32}$$

h_1 $\text{W/m}^2\text{°C}$ Coeficiente de transferencia de calor por convección

k_1 $\text{W/m}^\circ\text{C}$ Conductividad Térmica del aire

La conductividad térmica del aire obtenemos de tablas @

$T_f = 75^\circ\text{C} + 273 = 348^\circ\text{K}$

⁹⁴ Mills A.F. Transferencia de Calor. Pg. 293

⁹⁵ Karkekar B.V. Transferencia de Calor. Pg. 447

Tabla 4.12 Coeficiente de convección en la cámara de secado (h_1)

Denominación	Pared 1 (6,5*5,5) m	Pared 2 (6,5*5,5) M	Pared 3 (5,5*4) m	Puerta (5,5*4) m	Techo (6,5*4) m	Piso (6,5*4) m
Nusselts	945,992	945,992	945,992	945,992	1081	1081
Longitud característica (m)	5,5	5,5	5,5	5,5	6,5	6,5
Conductividad Térmica del aire (W/m°C)	2,99E-02	2,99E-02	2,99E-02	2,99E-02	2,99E-02	2,99E-02
Coeficiente de convección (W/m ² °C)	5,135	5,135	5,135	5,135	4,965	4,965

Obteniendo así la Resistencia térmica por convección forzada aire caliente – pared con la siguiente fórmula:

$$R_{cv1} = \frac{1}{h_1 * A_1} \quad \text{Ec. 4.33}$$

R_{cv1}	°C/W	Resistencia Térmica por convección forzada aire caliente- pared de la cámara de secado
h_1	W/m ² °C	Coeficiente de Convección
A_1	m ²	Área de las paredes

Tabla 4.13 Resistencia de Convección entre el aire caliente y la pared de la cámara de secado (R_{cv1})

Denominación	Pared 1 (6,5*5,5) m	Pared 2 (6,5*5,5) M	Pared 3 (5,5*4) m	Puerta (5,5*4) m	Techo (6,5*4) m	Piso (6,5*4) m
Área (m ²)	35,75	35,75	22	22	26	26
Coeficiente de convección (W/m ² °C)	5,135	5,135	5,135	5,135	4,965	4,965
Resistencia de Convección entre el aire caliente-cámara de secado (°C/W)	0,005	0,005	0,009	0,009	0,008	0,008

4.4.1.1.5.1.2 RESISTENCIA DE CONDUCCION A TRAVÉS DE LA PARED DE LA CAMARA DE SECADO (R_{cd})

$$R_{cd} = \frac{e_1}{k_1 * A_1} \quad \text{Ec.4.34}$$

$$T_f = 75^\circ C$$

$$T_{amb} = 23^\circ C$$

$$Tm = \frac{T_f + T_{amb}}{2} \quad \text{Ec. 4.35}$$

$$Tm = 49^\circ C + 273 = 322^\circ k$$

R_{cd}	$^\circ C/W$	Resistencia térmica por conducción a través de la pared de la cámara de secado
e_1	m	Espesores de la cámara de secado
k_1	$W/m^\circ C$	Coficiente de conductividad térmica
A_1	m^2	Área de las paredes de la cámara de secado
Tm	$^\circ C$	Temperatura media

Los valores de las conductividades térmicas están evaluados @ 322°K de acuerdo al material respectivamente.

Nota: La Conductividad térmica del piso y techo, es piedra mezclada - concreto⁹⁶

⁹⁶ Incropera, Frank P. De Witt, David P. Incropera. Fundamentos de Transferencia de calor. Cuarta edición. Tabla A3. Pp. 837. Prentice Hall. Copyright.1996

Tabla 4.14 Resistencia de Conducción a través de la pared de la cámara de secado (R_{cd})

Denominación	Pared 1 (6,5*5,5) m	Pared 2 (6,5*5,5) m	Pared 3 (5,5*4) m	Puerta(5,4*4) m			Techo (6,5*4) m	Piso (6,5*4) m
				Acero Inox.	Fibra vidrio	Aire		
Espesor (m)	0,3	0,3	0,3	0,01	0,07	0,02	0,3	0,3
Área (m ²)	35,75	35,75	22	22	22	22	26	26
Conductividad térmica (W/m °C)	0,72	0,72	0,72	1,49	0,038	0,029	1,4	1,4
Resistencia de Conducción a través de la pared de la cámara de secado (°C/W)	0,012	0,012	0,019	0,00031	0,084	0,032	0,008	0,008
Σ					0,115			

4.4.1.1.5.1.3 RESISTENCIA DE CONVECCION LIBRE POR EL FLUJO DEL AIRE ATMOSFERICO A TRAVES DE LA CAMARA DE SECADO (R_{cv2})

$$g = 9.81 \quad \frac{m}{s^2}$$

$$T_{amb} = 23 \quad ^\circ C$$

$$T_{is} = 50 \quad ^\circ C$$

$$\Delta T_1 = T_{is} - T_{amb} = 27 \quad ^\circ C$$

$$\beta = \frac{1}{T_{amb} + 273} \quad \text{Ec. 4.36}$$

$$Gr_1 = \frac{g\beta Lc_1^3 \Delta T_1}{\nu_1^2} \quad \text{Ec. 4.37}$$

β	1/K	Coeficiente de dilatación cubica
Gr_1		Numero de Grasshoff ⁹⁷
Lc_1	m	Longitud característica
ν_1	m ² /s	Viscosidad cinemática
g	m/s ²	Aceleración de la gravedad

Tabla 4.15 Constantes para convección libre

Constantes para convección libre promedio⁹⁸			
	Gr Pr	C	m
Planos verticales	10 ⁴ -10 ⁹	0,59	1/4
Planos verticales	10 ⁹ -10 ¹³	0,1	1/3
Superficie inferior de placa caliente	> 10 ⁵	0,58	1/5

Para determinar el número de Nusselt en convección natural utilizamos la siguiente fórmula⁹⁹.

$$Nu_2 = C(Gr_1 Pr_1)^m \left(\frac{Pr_1}{Pr_p} \right)^{0.25} \quad \text{Ec. 4.38}$$

El valor de C y m obtenemos de acuerdo a la tabla 4.15.

Para el cálculo del Coeficiente de transferencia de calor por convección libre obtenemos de la siguiente manera:

⁹⁷ Mills. A.F. Transferencia de Calor. Pag. 306

⁹⁸ Holman J. P. Transferencia de calor pG 308

⁹⁹ Bonilla, Isaac. Montenegro, Fernando. Diseño de un secador de madera utilizando un intercambiador de calor de flujo cruzado. Pp. 116. Tesis, ESPE. Quito.

$$h_2 = \frac{Nu_2 * k_2}{Lc_1} \quad \text{Ec. 4.39}$$

h_2	W/m ² °C	Coeficiente de transferencia de calor por convección libre
k_2	W/m°C	Conductividad Térmica del aire

La viscosidad cinemática obtenemos de tablas @ $T_f = 75^\circ\text{C} + 273 = 348^\circ\text{K}$

Prandt, Prp está evaluado @ $T_m = 62.5^\circ\text{C} + 273 = 322^\circ\text{k}$

La conductividad térmica esta evaluada @ $T_m = 62.5^\circ\text{C} + 273 = 322^\circ\text{k}$

Obteniendo así la Resistencia térmica por convección libre con la siguiente fórmula:

$$R_{cv2} = \frac{1}{h_2 * A_2} \quad \text{Ec. 4.40}$$

R_{cv2}	°C/W	Resistencia Térmica por convección libre por el flujo del aire atmosférico a través de la cámara de secado
h_2	W/m ² °C	Coeficiente de transferencia de calor por convección libre
A_2	m ²	Área de las paredes

Tabla 4.16 Resistencia térmica por convección libre por el flujo del aire atmosférico a través de la pared de la cámara de secado (R_{cv2})

Denominación	Pared 1 (6,5*5,5) m	Pared 2 (6,5*5,5) M	Pared 3 (5,5*4) m	Puerta (5,5*4) m	Techo (6,5*4) m	Piso (6,5*4) m
Longitud característica (m)	5,5	5,5	5,5	5,5	6,5	6,5
Área (m ²)	35,75	35,75	22	22	26	26
Gravedad (m/s ²)	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81
Coefficiente de dilatación cúbica (1/K)	0,003378	0,003378	0,003378	0,003378	0,003378	0,003378
Diferencia de Temperatura (°C)	52	52	52	52	52	52
Viscosidad cinemática (m ² /s)	0,000015	0,000015	0,000015	0,000015	0,000015	0,000015
Grasshooft	1,19E+12	1,19E+12	1,19E+12	1,19E+12	1,96E+12	0
Pr @ Temperatura media (322 °K)	0,70392	0,70392	0,70392	0,70392	0,70392	0,70392
GrPr	8,36E+11	8,36E+11	8,36E+11	8,36E+11	1,38E+12	0,00E+00
Constante C de acuerdo a la tabla 4.12	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Constante m de acuerdo a la tabla 4.12	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3
Conductividad térmica a la Temperatura media (W/m °C)	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029
Nusselt en convección natural	953,842	953,842	953,842	953,842	1127	0
Coefficiente de transferencia de calor por convección libre (W/m ² °C)	4,843	4,843	4,843	4,843	4,843	0
Convección libre (°C/W)	2,88E-03	2,88E-03	4,69E-03	4,69E-03	7,94E-03	0

Finalmente tenemos la Potencia de las pérdidas de calor a través de las paredes:

$$R_{T1} = R_{CV1} + R_{CD} + R_{CV2}$$

$$T_f = 75^\circ\text{C}$$

$$T_{amb} = 23^\circ\text{C}$$

$$Qp_1 = \frac{T_f - T_{amb}}{R_{T1}} (\text{W})$$

Tabla 4.17 Potencia de las pérdidas de calor a través de la cámara de secado (Q_{p1})

Denominación	Pared 1 (6,5*5,5) m	Pared 2 (6,5*5,5) m	Pared 3 (5,5*4) M	Puerta (5,5*4) m	Techo (6,5*4) m	Piso (6,5*4) m
RT_1 ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)	2,00E-02	2,00E-02	3,25E-02	1,29E-01	2,39E-02	0,01598888
$Q_{p_{ind}}^{100}$ (W)	2,60E+03	2,60E+03	1,60E+03	4,03E+02	2173,015	3252,259
Q_{p1} (W)	12633,83					

4.4.1.1.5.2 PERDIDAS DE CALOR A TRAVÉS DE LAS PAREDES DE LA CAMARA DE COMBUSTION (Q_{p2})

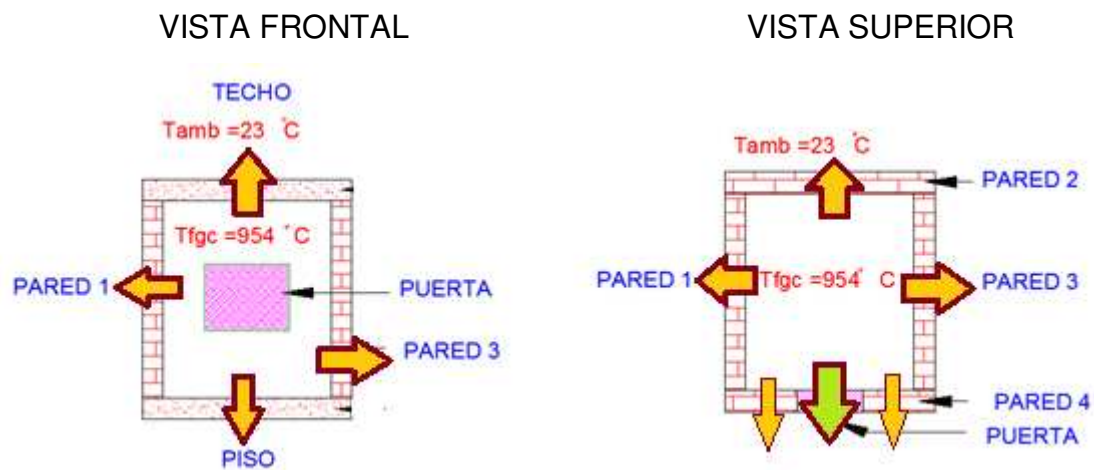


Figura 4. 12 Distribución de Temperaturas en la Cámara de Combustión con flujos de calor

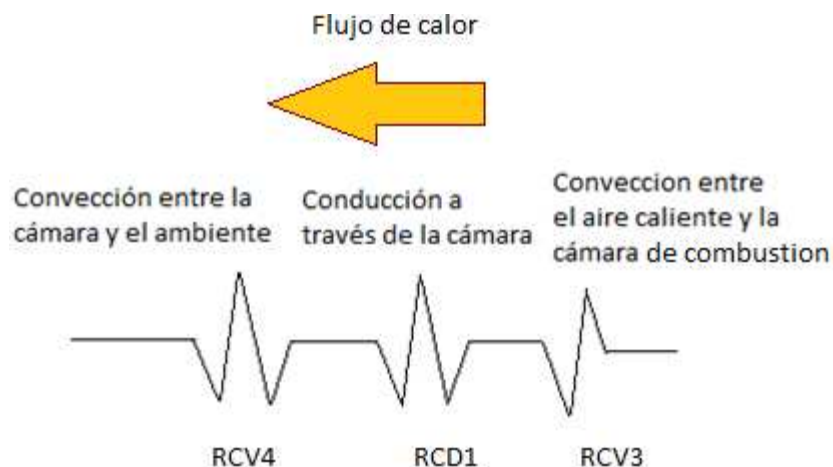


Figura 4. 13 Distribución de las Resistencias Térmicas

¹⁰⁰ Potencia individual de las pérdidas a través de la cámara de secado.

Tomando en cuenta que el flujo de energía que ingresa a la pared es igual al flujo de energía que sale de la pared¹⁰¹, utilizamos las siguientes fórmulas:

$$Q_{p2} = \frac{T_{f_{gc}} - T_{amb}}{R_{T2}} \quad \text{Ec. 4.41}$$

$$R_{T2} = R_{CV3} + R_{Cd1} + R_{CV4} \quad \text{Ec. 4.42}$$

$T_{f_{gc}} = 954$	°C	Temperatura final de los gases de combustión
$T_{amb} = 23$	°C	Temperatura ambiente
R_{T2}	°C/W	Resistencia térmica total de la cámara de combustión
R_{CV3}	°C /W	Resistencia térmica por convección entre el aire caliente y la pared de la cámara de combustión
R_{Cd1}	°C/W	Resistencia térmica por conducción a través de la pared de la cámara de combustión
R_{CV4}	°C/W	Resistencia térmica por convección libre entre la pared de la cámara de combustión y el aire ambiente

4.4.1.1.5.2.1 RESISTENCIA DE CONVECCION FORZADA POR EL FLUJO DEL AIRE CALIENTE A TRAVES DE LA CAMARA DE COMBUSTION (Rcv3)

Calculamos el número de Reynolds para determinar el tipo de flujo, ya sea laminar o turbulento¹⁰².

Para flujo laminar	Reynolds $< 5 \cdot 10^5$
Para flujo Turbulento	Reynolds $> 5 \cdot 10^5$

$$Re_2 = \frac{v_2 * Lc_2}{\nu_2}$$

¹⁰¹ Karlekar. B.V. Transferencia de calor. Pg.12

¹⁰² Mills A.F. Transferencia de Calor. Pg. 293

Re_2		Número de Reynolds
$v_2 = 9$	m/s	Velocidad en la cámara de combustión (1.5-15) ¹⁰³
Lc_2	m	Longitud característica
ν_2	m ² /s	Viscosidad cinemática

Nota: La longitud característica depende de la dirección del flujo del aire en el interior de la cámara de combustión.

La viscosidad cinemática obtenemos de tablas @ $T_{f_{gc}} = 954^{\circ}C + 273 = 1227^{\circ}K$

Tabla 4.18 Tipo de flujo en la cámara de combustión (Re_2)

Denominación	Pared 1 (1*1) m	Pared 2 (1*) m	Pared 3 (1*1) m	Pared 4 (1*0,7)(0,7*0,3) m	Puerta (0,3*0,3) m	Piso (1*1) m	Techo (1*1) m
Velocidad (m/s)	9	9	9	9	9	9	9
Longitud característica (m)	1	1	1	1	0,3	1	1
Viscosidad cinemática (m ² /s)	1,68E-04	1,68E-04	1,68E-04	1,68E-04	1,68E-04	1,68E-04	1,68E-04
Reynolds	53320	53320	53320	53320	16071,43	53320	53320
Tipo de flujo	Laminar	Laminar	Laminar	Laminar	Laminar	Laminar	Laminar

Para el cálculo del número de Nusselt en una placa plana con flujo forzado, utilizamos las siguientes formulas¹⁰⁴:

$$Nu_3 = 0.67Re_2^{1/2}Pr_2^{1/3} \quad \text{Para flujo laminar} \quad Re < 5 \cdot 10^5 \quad \text{Ec. 4.43}$$

$$Nu_3 = 0.029Re_2^{0.8}Pr_2^{0.43} \quad \text{Para flujo Turbulento} \quad Re > 5 \cdot 10^5 \quad \text{Ec. 4.44}$$

Nu_3 Numero de Nusselt de la cámara de combustión

Pr_2 Numero de Prandtl de la cámara de combustión

El número de Prandtl obtenemos de Tablas @ $T_{f_{gc}} = 954^{\circ}C + 273 = 1227^{\circ}K$

¹⁰³American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Ashrae Handbook Equipment. Second Printing. New York, Copyright. pp26-13

¹⁰⁴ Mills A.F. Transferencia de Calor. Pg.293

Tabla 4.19 Cálculo de nusselts en la cámara de combustión (Nu_3)

Denominación	Pared 1 (1*1) m	Pared 2 (1*) m	Pared 3 (1*1) m	Pared 4 (1*0,7)(0,7*0,3) m	Puerta (0,3*0,3) m	Piso (1*1) m	Techo (1*1) m
Prandtl	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72
Nusselts	138,661	138,661	138,661	138,661	75,948	138,661	138,661

El coeficiente de Transferencia de calor por convección¹⁰⁵ obtenemos de la siguiente manera:

$$h_3 = \frac{Nu_3 * k_3}{Lc_2} \quad \text{Ec. 4.45}$$

h_3 W/m²°C Coeficiente de transferencia de calor por convección

k_3 W/m°C Conductividad Térmica del aire

La conductividad térmica del aire obtenemos de tablas @

$$T_{f_{gc}} = 954^\circ C + 273 = 1227^\circ K$$

Tabla 4.20 Coeficiente de convección en la cámara de combustión (h_3)

Denominación	Pared 1 (1*1) m	Pared 2 (1*) m	Pared 3 (1*1) m	Pared 4 (1*0,7)(0,7*0,3) m	Puerta (0,3*0,3) m	Piso (1*1) m	Techo (1*1) M
Nusselts	138,661	138,661	138,661	138,661	75,948	138,661	138,661
Longitud característica (m)	1	1	1	1	0,3	1	1
Conductividad Térmica del aire (W/m°C)	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077
Coeficiente de convección (W/m²°C)	10,677	10,677	10,677	10,677	19,493	10,677	10,677

¹⁰⁵ Karkekar B.V. Transferencia de Calor. Pg. 447

Obteniendo así la Resistencia térmica por convección forzada aire caliente – pared de la cámara de combustión con la siguiente fórmula:

$$R_{cv3} = \frac{1}{h_3 * A_3} \quad \text{Ec. 4.46}$$

R_{cv3}	°C/W	Resistencia Térmica por convección forzada aire Caliente – pared de la cámara de combustión
h_3	W/m ² °C	Coefficiente de Convección
A_3	m ²	Área de las paredes de la cámara de combustión

Tabla 4.21 Resistencia de Convección entre la pared de la cámara de combustión y el aire ambiente (R_{cv3})

Denominación	Pared 1 (1*1) m	Pared 2 (1*) m	Pared 3 (1*1) m	Pared 4 (1*0,7)(0,7*0,3) m	Puerta (0,3*0,3) m	Piso (1*1) m	Techo (1*1) m
Área (m ²)	1	1	1	0,91	0,09	1	1
Coefficiente de convección (W/m ² °C)	10,677	10,677	10,677	10,677	19,493	10,677	10,677
Convección entre la cámara de combustión y el aire ambiente (°C/W)	0,094	0,094	0,094	0,103	21,012	0,094	0,094

4.4.1.1.5.2.2 RESISTENCIA DE CONDUCCION A TRAVÉS DE LA PARED DE LA CAMARA DE COMBUSTION (R_{cd1})

$$R_{cd1} = \frac{e_2}{k_3 * A_3} \quad \text{Ec. 4.47}$$

$$T_{f_{gc}} = 954^\circ C$$

$$T_{amb} = 23^\circ C$$

$$T_{m_{cc}} = \frac{T_{f_{gc}} + T_{amb}}{2} \quad \text{Ec. 4.48}$$

$$Tm_{cc} = 488.5^{\circ}C + 273 = 761.5^{\circ}K$$

R_{cd1}	$^{\circ}C/W$	Resistencia térmica por conducción a través de la pared de la cámara de combustión
e_2	m	Espesores de la cámara de combustión
k	$W/m^{\circ}C$	Coefficiente de conductividad térmica
A_3	m^2	Área a través de las paredes de la cámara de Combustión
Tm_{cc}	$^{\circ}C$	Temperatura media de la cámara de combustión

Los valores de las conductividades térmicas están evaluados @ $Tm_{cc} = 488.5^{\circ}C + 273 = 761.5^{\circ}K$ excepto para el piso.

Nota: La Conductividad térmica del piso de la cámara de combustión es piedra mezclada - concreto¹⁰⁶.

Tabla 4.22 Resistencia de Conducción a través de la pared de la cámara de combustión (R_{cd1})

Denominación	Pared 1 (1*1) m	Pared 2 (1*) M	Pared 3 (1*1) m	Pared 4 (1*0,7)(0,7*0,3) m	Puerta (0,3*0,3) m	Piso (1*1) m	Techo (1*1) m
Espesor (m)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,1	0,3	0,3
Área (m^2)	1	1	1	0,91	0,09	1	1
Conductividad térmica ($W/m^{\circ}C$)	0,72	0,72	0,72	0,72	22,061	1,4	1,4
Conducción a través de la pared de la cámara ($^{\circ}C/W$)	0,417	0,417	0,417	0,458	0,050	0,214	0,214

¹⁰⁶ Incropera, Frank P. De Witt, David P. Incropera. Fundamentos de Transferencia de calor. Cuarta edición. Tabla A3. Pp. 837 Prentice Hall. Copyright.1996

4.4.1.1.5.2.3 RESISTENCIA DE CONVECCION LIBRE POR EL FLUJO DEL AIRE ATMOSFERICO A TRAVES DE LA CAMARA DE COMBUSTION (Rcv4)

$$g = 9.81 \frac{m}{s^2}$$

$$T_{amb} = 23^{\circ}C$$

$$T_{f_{gc}} = 954^{\circ}C$$

$$\Delta T_2 = T_{f_{gc}} - T_{amb} = 931^{\circ}C$$

$$\beta = \frac{1}{T_{amb} + 273}$$

$$Gr_2 = \frac{g\beta Lc_2^3 \Delta T_2}{\nu_2^2}$$

β	1/K	Coeficiente de dilatación cubica
Gr_2		Numero de Grasshoff ¹⁰⁷
Lc_2	m	Longitud característica
ν_2	m ² /s	Viscosidad cinemática
g	m/s ²	Aceleración de la gravedad

Para determinar el número de Nusselt en convección natural utilizamos la siguiente fórmula:

$$Nu_4 = C(Gr_2 Pr_2)^m \left(\frac{Pr_2}{Pr_p} \right)^{0.25}$$

El valor de C y m obtenemos de acuerdo a la tabla anterior.

Para el cálculo del Coeficiente de transferencia de calor por convección libre obtenemos de la siguiente manera:

¹⁰⁷ Mills. A.F. Transferencia de Calor. Pag. 306

$$h_4 = \frac{Nu_4 * k_4}{Lc_2} \quad \text{Ec. 4.49}$$

h_4	W/m ² °C	Coefficiente de transferencia de calor por convección libre
k_4	W/m°C	Conductividad Térmica del aire

La viscosidad cinemática obtenemos de tablas @ $T_{fgc} = 954^\circ C$

Prandt está evaluado @ $T_{m_{cc}} = 488.5^\circ C + 273 = 761.5^\circ K$

La conductividad térmica esta evaluada @ $T_{m_{cc}} = 488.5^\circ C + 273 = 761.5^\circ K$

Obteniendo así la Resistencia térmica por convección libre con la siguiente fórmula:

$$R_{cv4} = \frac{1}{h_4 * A_4} \quad \text{Ec. 4.50}$$

R_{cv4}	°C/W	Resistencia Térmica por convección libre por el Flujo del aire atmosférico a través de la cámara de combustión
h_4	W/m ² °C	Coefficiente de transferencia de calor por convección libre
A_4	m ²	Área de las paredes

Tabla 4.23 Resistencia de Convección libre por el flujo del aire atmosférico a través de la pared de la cámara de combustión (R_{cv4})

Denominación	Pared 1 (1*1) m	Pared 2 (1*) m	Pared 3 (1*1) m	Pared 4 (1*0,7)(0,7*0,3) m	Puerta (0,3*0,3) m	Piso (1*1) M	Techo (1*1) m
Longitud característica (m)	1	1	1	1	0,3	1	1
Área(m ²)	1	1	1	0,91	0,09	1	1
Gravedad	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81
Coefficiente de dilatación cúbica (1/K)	0,003378	0,003378	0,003378	0,003378	0,003378	0,003378	0,003378
Diferencia de Temperatura (°C)	931	931	931	931	931	931	931
Viscosidad cinemática (m ² /s)	0,0000223	0,0000223	0,0000223	0,0000223	0,0000223	0,0000223	0,0000223
Grasshooft	6,21E+10	6,21E+10	6,21E+10	6,21E+10	1,68E+09	0	6,21E+10
Pr @ Temperatura media (761,5°K)	0,7036	0,7036	0,7036	0,7036	0,7036	0,7036	0,7036
GrPr	4,37E+10	4,37E+10	4,37E+10	4,37E+10	1,18E+09	0,00E+00	4,37E+10
Constante C de acuerdo a la tabla 4.12	0,1	0,1	0,1	0,1	0,59		0,59
Constante m de acuerdo a la tabla 4.12	1/3	1/3	1/3	1/3	1/4		1/4
Conductividad térmica a la Temperatura media (W/m °C)	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055
Nusselt en convección natural	350,182	350,182	350,182	350,182	108,807	0	350,182
Coefficiente de transferencia de calor por convección libre (W/m ² °C)	9,175	9,175	9,175	9,175	9,502	0	9,175
Resistencia térmica por Convección libre (°C/W)	0,109	0,109	0,109	0,120	1,169	0,000	0,109

Finalmente tenemos la Potencia de las pérdidas de calor a través de las paredes de la cámara de combustión:

$$R_{T_2} = R_{CV3} + R_{Cd1} + R_{CV4}$$

$$T_{f_{gc}} = 954^{\circ}C$$

$$T_{amb} = 23^{\circ}C$$

$$Q_{p_2} = \frac{T_{f_{gc}} - T_{amb}}{R_{T_2}}$$

Tabla 4.24 Potencia de las pérdidas de calor a través de las paredes de la cámara de combustión (Q_{p_2})

Denominación	Pared 1 (1*1) m	Pared 2 (1*) m	Pared 3 (1*1) m	Pared 4 (1*0,7)(0,7*0,3) m	Puerta (0,3*0,3) m	Techo (1*1) m
R_{T_2} ($^{\circ}C/W$)	0,619	0,619	0,619	0,681	22,232	0,308
$Q_{p_{indcc}}$ (W)	1503,265	1503,265	1503,265	1367,971	41,877	3023,258
Q_{p_2} (W)	8942,901					

4.4.1.1.6 POTENCIA PARA CALENTAR LAS INSTALACIONES (Q_{ins})

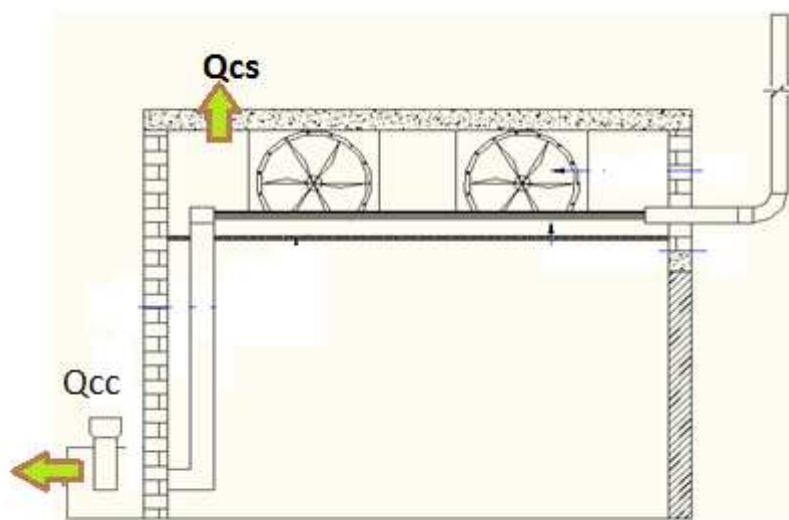


Figura 4. 14 Potencia para calentar instalaciones

Se determina la potencia correspondiente a las paredes, techo, piso y puertas tanto de la cámara de secado como de la cámara de combustión

$$Q_{ins} = Q_{cs} + Q_{cc} \quad \text{Ec.4.51}$$

4.4.1.1.6.1 POTENCIA PARA CALENTAR LA CAMARA DE SECADO (Q_{cs})

$$Q_{cs} = \frac{m \cdot Cp \cdot \left\{ \left[\frac{(T_i + T_e)}{2} \right] - T_{amb} \right\}}{t} \quad \text{Ec. 4.52}$$

$$m = \rho \cdot v \quad \text{Ec. 4.53}$$

$$v = A \cdot e \quad \text{Ec. 4.54}$$

Obtenemos la temperatura exterior e interior mediante la siguiente igualdad:

$$Q_{P_1} = \frac{T_f - T_{amb}}{R_{T_1}} = \frac{T_f - T_i}{R_{cv1}} = \frac{T_i - T_e}{R_{cd}} = \frac{T_e - T_{amb}}{R_{cv2}} \quad \text{Ec. 4.55}$$

$$T_i = T_f - (Q_{P_1} \cdot R_{cv1}) \quad \text{Ec. 4.56}$$

$$T_e = T_{amb} - (Q_{P_1} \cdot R_{cv2}) \quad \text{Ec. 4.57}$$

m	kg	Masa de las paredes, techo, piso, puerta
A	m ²	Área de las paredes, techo, piso, puerta
e	m	Espesor de las paredes, techo, piso, puerta
ρ	kg/m ³	Densidad de acuerdo al material
v	m ³	Volumen
Cp	J/kg °K	Calor específico de las paredes, techo, piso, puerta

$t = 28800$	seg	Tiempo de calentamiento
$Q_{P_1} = 282.178$	W	Potencia
$T_i = 50.63$	°C	Temperatura interior de la cámara de secado
$T_e = 34$	°C	Temperatura exterior de la cámara de secado
$T_f = 75$	°C	Temperatura final
$T_{amb} = 23$	°C	Temperatura ambiente
$R_{T_1} = 0.36$	°C/W	Resistencia
$R_{cv1} = 0.006$	°C/W	Convección
$R_{cd} = 0.35$	°C/W	Conducción
$R_{cv2} = 0.002$	°C/W	Convección

Tabla 4.25 Potencia para calentar la cámara de secado (Qcs)

Denominación	Pared 1 (6,5*5,5)	Pared 2 (6,5*5,5)	Pared 3 (5,5*4)	Puerta (5,5*4)	Techo (6,5*4)	Piso (6,5*4)
Área (m ²)	35,75	35,75	22	22	26	26
espesor (m)	0,35	0,35	0,35	0,1	0,35	0,35
Volumen (m ³)	12,5125	12,5125	7,7	2,2	9,1	9,1
Densidad (kg/m ³)	1920	1920	1920	7900	2300	2300
Masa (kg)	24024	24024	14784	17380	20930	20930
Cp (J/kg °K)	835	835	835	477	880	880
(((Ti+Te)/2)- Tamb) (°C)	26,11	26,11	26,11	26,11	26,11	26,11
Tiempo (s)	28800	28800	28800	28800	28800	28800
Q_{ics} (W)	18186,37	18186,37	11191,61	7515,92	16698,07	16698,07
Q_{cs} (W)	88476,43					

Nota: La densidad del bloque es cero por eso solo consideramos la del ladrillo evaluado a Temperatura ambiente.

4.4.1.1.6.2 POTENCIA PARA CALENTAR LA CAMARA DE COMBUSTIÓN (Q_{cc})

$$Q_{cc} = \frac{m_{cc} * Cp_{cc} * \left\{ \left[\frac{(T_{i_{cc}} + T_{e_{cc}})}{2} \right] - T_{amb} \right\}}{t} \quad \text{Ec. 4.58}$$

$$m_{cc} = \rho_{cc} * v_{cc} \quad \text{Ec. 4.59}$$

$$v_{cc} = A_{cc} * e_{cc} \quad \text{Ec. 4.60}$$

Obtenemos la temperatura exterior e interior mediante la siguiente igualdad:

$$Q_{P_2} = \frac{T_{fgc} - T_{amb}}{R_{T_2}} = \frac{T_{fgc} - T_{i_{cc}}}{R_{cv3}} = \frac{T_{i_{cc}} - T_{e_{cc}}}{R_{cd1}} = \frac{T_{e_{cc}} - T_{amb}}{R_{cv4}} \quad \text{Ec. 4.61}$$

$$T_{i_{cc}} = T_{fgc} - (Q_{P_2} * R_{cv3}) \quad \text{Ec. 4.62}$$

$$T_{e_{cc}} = T_{amb} + (Q_{P_2} * R_{cv4}) \quad \text{Ec. 4.63}$$

m_{cc}	kg	Masa de las paredes, techo, piso, puerta
A_{cc}	m ²	Área de las paredes, techo, piso, puerta
e_{cc}	m	Espesor de las paredes, techo, piso, puerta
ρ_{cc}	kg/m ³	Densidad de acuerdo al material
v_{cc}	m ³	Volumen
Cp_{cc}	J/kg °K	Calor específico de las paredes, techo piso, puerta
t	= 28800 seg	Tiempo de calentamiento
Q_{P_2}	= 827.067 W	Potencia
$T_{i_{cc}}$	= 918.43 °C	Temperatura interior de la cámara de Combustión
$T_{e_{cc}}$	= 63.526 °C	Temperatura exterior de la cámara de Combustión

$T_{fgc} = 954$	°C	Temperatura final
$T_{amb} = 23$	°C	Temperatura ambiente
$R_{T2} = 1.6$	°C/W	Resistencia
$R_{cv3} = 0.043$	°C/W	Convección
$R_{cd1} = 1.507$	°C/W	Conducción
$R_{cv4} = 0.049$	°C/W	Convección

Tabla 4.26 Potencia para calentar la cámara de combustión (Q cc)

DENOMINACIÓN	Pared 1 (1*1)	Pared 2 (1*1)	Pared 3 (1*1)	Pared (1*0,7)(0,7*0,3)	Puerta (0,3*0,3)	Piso (1*1)	Techo (1*1)
Área (m ²)	1	1	1	0,91	0,09	1	1
espesor (m)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Volumen (m ³)	0,1	0,1	0,1	0,091	0,009	0,1	0,1
Densidad (kg/m ³)	1920	1920	1920	1920	7900	2300	1920
Masa (kg)	192	192	192	174,72	71,1	230	192
Cp (J/kg °K)	835	835	835	835	477	880	835
(((Ti+Te)/2) - T amb) (°C)	663,76	663,76	663,76	663,76	663,76	663,76	663,76
Tiempo (s)	28800	28800	28800	28800	28800	28800	28800
Q_{icc} (W)	3694,93	3694,93	3694,93	3362,38	781,63	4664,75	3694,93
Q_{cc} (W)	23588,50						

Entonces la Potencia de las instalaciones es:

$$Q_{ins} = Q_{cs} + Q_{cc} = 114668.65 \text{ (W)}$$

4.4.1.1.7 POTENCIA PARA EVAPORAR EL AGUA QUE CONTIENE LA MADERA (Qe_a)

El tiempo requerido para evaporar el agua que corresponde al tiempo de secado de la madera, dependiendo de la especie, varía de 5 a 30 días¹⁰⁸. En este caso tomamos el tiempo más crítico correspondiente a 5 días o 432000 (s).

$$Qe_a = \frac{m_a (h_2 - h_1)}{t} \quad \text{Ec. 4.64}$$

$$m_a = m_m * (CH_i - CH_f)$$

AIRE EN CONDICIONES INICIALES:

Ingresamos los siguientes datos:

Psicrometría		
Datos		
Unidades:	<input checked="" type="radio"/> SI	<input type="radio"/> Ing.
Parámetros	Valor	Unidad
Temperatura:	50	C
Temp. b. húmedo:	48	C
Humedad relativa:	89.567900376	%
Punto de rocío	47.778769470	C
Altitud SNM	656	m
<input type="button" value="Calcular"/>		
Resultados		
Presión Atmosférica	0.9369357968	bar
Pv sat	123.49824742	mbar
Pv	110.61478722	mbar
Humedad absoluta	0.0832635221	kg/kg
Entalpía	266.07301617	kJ/kg
Volumen específico	1.1212660868	m3/kg

Figura 4. 15 Aire en condiciones iniciales para evaporar el agua que contiene la madera¹⁰⁹

Obteniendo así la entalpía final del aire:

$$h_1 = 266073 \text{ J/kg}$$

¹⁰⁸ Fuente propia

¹⁰⁹ WEB http://www.freedownloadmanager.org/es/downloads/programa_de_psicometr%C3%ADa._gratis/

AIRE EN CONDICIONES FINALES:

Ingresamos los siguientes datos:

Psicrometría		
Datos		
Unidades:	<input checked="" type="radio"/> SI	<input type="radio"/> Ing.
Parámetros	Valor	Unidad
Temperatura:	75	C
Temp. b. húmedo:	50	C
Humedad relativa:	28.367867951	%
Punto de rocío	47.573681926	C
Altitud SNM	656	m
<input type="button" value="Calcular"/>		
Resultados		
Presión Atmosférica	0.9369357968	bar
Pv sat	385.92256924	mbar
Pv	109.47800483	mbar
Humedad absoluta	0.0822946132	kg/kg
Entalpía	292.48691729	kJ/kg
Volumen específico	1.2063490545	m ³ /kg

Figura 4. 16 Aire en condiciones finales-Para evaporar el agua que contiene la madera¹¹⁰
Obteniendo así la entalpía final del agua:

$$h_2 = 292486 \text{ J/kg}$$

$CH_i = 57\%$	%	Contenido de humedad inicial	
$CH_f = 10$	%	Contenido de humedad final	
$m_m = 16290$	kg	Masa de la madera	
$m_a = 7656.3$	kg	Masa de agua	
$h_2 = 292486$	J/kg	Entalpía final del agua	
$h_1 = 266073$	J/kg	Entalpía inicial del agua	
$t = 432000$	seg	Tiempo para evaporar el agua	
$Qe_a = 46811$		Potencia para evaporar el agua que	W
		Contiene la madera	

¹¹⁰WEB http://www.freedownloadmanager.org/es/downloads/programa_de_psicometr%C3%ADa._gratis/

Finalmente la potencia es:

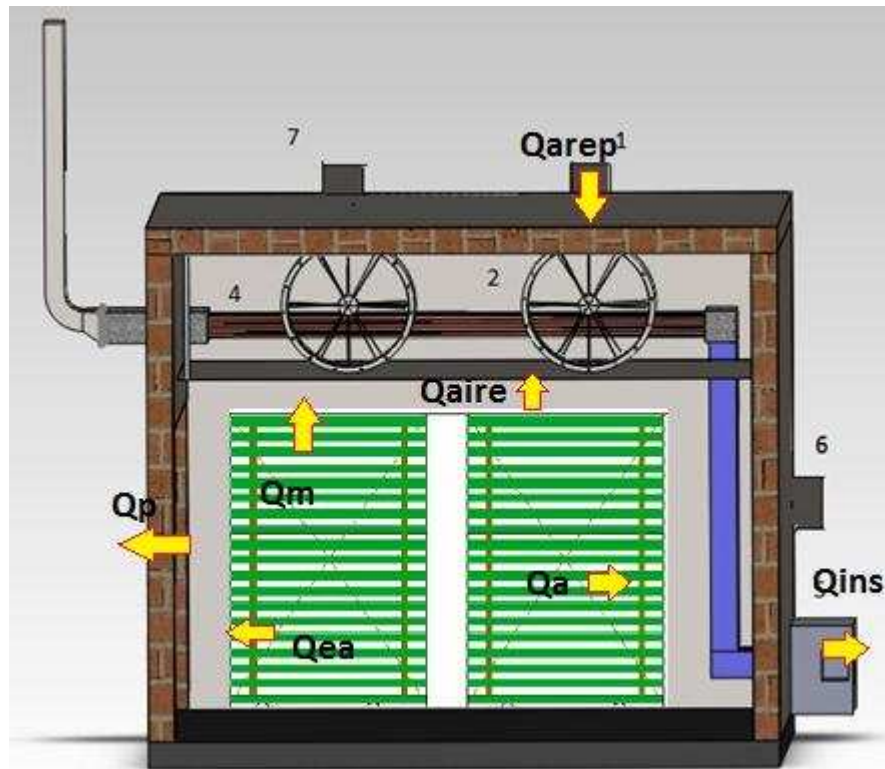


Figura 4. 17 Esquema de las potencias en el secador de madera

$$Q = (Q_m + Q_a + Q_{aire} + Q_{arep} + Q_p + Q_{ins} + Q_{ea})Fs \quad (W)$$

$$Q = 485610 \quad W ; 485 \text{ KW}$$

Con este valor, procedemos a realizar el cálculo del Intercambiador de calor

4.4.2 DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

Tabla 4.27 Datos a ingresar para el intercambiador de calor:

AIRE	GASES DE COMBUSTION
$T_{e_{aire}} = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{e_{gc}} = 954\text{ }^{\circ}\text{C}$
$T_{s_{aire}} = 75\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{s_{gc}} = 195\text{ }^{\circ}\text{C}$
$\dot{m}_{aire} = 28\text{ Kg/s}$	$\dot{m}_{gc} = 0.46\text{ Kg/s}$
$C_{p_{aire}} = 1008\text{ } \frac{\text{J}}{\text{Kg}^{\circ}\text{K}}$	$C_{p_{gc}} = 1251.17\text{ } \frac{\text{J}}{\text{Kg}^{\circ}\text{K}}$
$\mu_{aire} = 196.4^{-7}\text{ } \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}$	$\mu_{gc} = 452^{-7}\text{ } \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}$
$\rho_{aire} = 1.067\text{ } \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$	$\rho_{gc} = 0.35\text{ } \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$
$K_{aire} = 28.15^{-3}\text{ } \frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{K}}$	$K_{gc} = 0.06\text{ } \frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{K}}$
$Pr_{aire} = 0.7035$	$Pr_{gc} = 0.812$

CALCULO DEL DMLT:

$$\Delta T1 = T_{s_{gc}} - T_{e_{aire}} = 172^{\circ}\text{C} \quad \text{Ec. 4.65}$$

$$\Delta T2 = T_{e_{gc}} - T_{s_{aire}} = 879^{\circ}\text{C} \quad \text{Ec. 4.66}$$

$$DMLT = \left(\frac{\Delta T2 - \Delta T1}{\ln\left(\frac{\Delta T2}{\Delta T1}\right)} \right) = 433.39 \quad \text{Ec. 4.67}$$

$$R = \frac{T_{e_{aire}} - T_{s_{aire}}}{T_{s_{gc}} - T_{e_{gc}}} = 0.069 \quad (\text{Referencia 109}) \quad \text{Ec. 4.68}$$

¹¹¹Incropera, Frank P. De Witt, David P. Incropera. Fundamentos de Transferencia de calor. Cuarta edición. Fig 11. Pp 593. Prentice Hall. Copyright.1996

$$P = \frac{T_{s_{gc}} - T_{e_{gc}}}{T_{e_{aire}} - T_{e_{gc}}} = 0.815 \quad (\text{Referencia 110}) \quad \text{Ec. 4.69}$$

$$\text{Factor de Corrección}^{113} \quad F = 0.99$$

$$DMLT_c = DMLT * F = 429.065 \quad \text{Ec. 4.70}$$

DATOS DE LA TUBERIA A UTILIZAR, PARA NUESTRO DISEÑO:

do	= 0.0254	m	12 BWG Cédula 40
di	= 0.0198	m	
espesor	= 0.0027	m	
L	= 6	m	
K	= 60.5	W/m°K	

CALCULO DEL AREA:

$$Q = A * DMLT_c * U_o \quad \text{Ec. 4.71}$$

$$A = \frac{Q}{DMLT_c * U_o} = 30.55 \quad m^2$$

$$U_o = 37 \quad \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (\text{Referencia 112})$$

En este caso escogimos el coeficiente global de transferencia de calor con un valor de $37 \frac{W}{m^2 \cdot K}$, ya que es una constante en la cual comprende el rango desde 10-40 $\frac{W}{m^2 \cdot K}$, es decir podemos aplicar de acuerdo a normas del diseño térmico, cualquiera de estos valores comprendidos; además tanto el área como el coeficiente global, son inversamente proporcionales, de manera que nos resulta

¹¹² Incropera, Frank P. De Witt, David P. Incropera. Fundamentos de Transferencia de calor. Cuarta edición. Fig 12. Pp 593. Prentice Hall. Copyright.1996

¹¹³ Incropera, Frank P. De Witt, David P. Incropera. Fundamentos de Transferencia de calor. Cuarta edición. Fig 13. Pp 594. Prentice Hall. Copyright.1996

¹¹⁴ Kern Donald. Procesos de Transferencia de Calor. Decima sexta Edición. Tabla A10. Pp 949. México. Cia. Editorial Continental S.A

más práctico ir variando el coeficiente global, porque sabemos los valores ya tabulados, mientras que el área de transferencia de calor no.

$$A = n_{tubos} * \pi * d_o * L = 30.55 \text{ m}^2 \quad \text{Ec. 4.72}$$

$$n_{tubos} = 68 \text{ tubos}$$

Es decir vamos a tener una distribución de los tubos de la siguiente manera:

17 FILAS DE 4 TUBOS

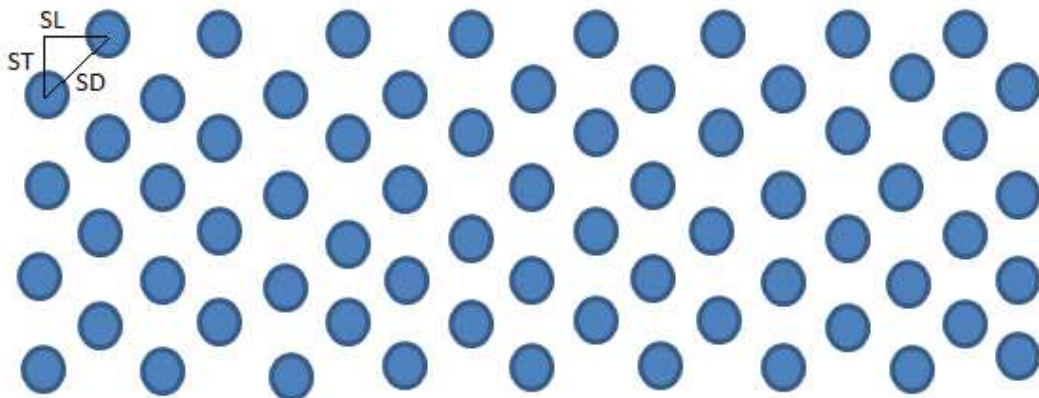


Figura 4. 18 Disposición de los tubos en el Intercambiador de calor

Disposición de los tubos: Paso Transversal y Longitudinal-Escalonados¹¹⁵

$$PT = PL = 1.25 \text{ plg} = 0.03175 \text{ m}$$

¹¹⁵ Kern Donald. Procesos de Transferencia de Calor. Decimasegunda Edición. Tabla 9. Pp. 946. México. Cia. Editorial Continental S.A

ST = PT ; Paso Transversal

SL = PL ; Paso Longitudinal

$$SD = \sqrt{SL^2 + \left(\frac{ST}{2}\right)^2} = 0.035 \text{ m} ; \text{ Paso Diagonal}^{116} \quad \text{Ec. 4.73}$$

NL = 17; Número de hileras de tubos Longitudinal

NT = 4 ; Número de hileras de tubos transversal

Np = 1 ; Número de pasos en los tubos

CALCULO DE LA VELOCIDAD MAXIMA DEL AIRE¹¹⁷:

$$V_{max\text{aire}} = \frac{ST}{2*(SD-do)} * V_{aire} = 3.144 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{Ec. 4.74}$$

CALCULO DE REYNOLDS PARA EL AIRE

$$Re_{aire} = \frac{\rho_{aire} * V_{max\text{aire}}}{\mu_{aire}} = 1.708^5 \text{ (Flujo Turbulento)}^{118} \quad \text{Ec. 4.75}$$

CALCULO DE NUSSELT'S PARA EL AIRE:

Como el Número de filas NL¹¹⁹ > 16

$$Nu_{aire} = 0.35 * \left(\frac{ST}{SL}\right)^{0.2} * Re_{aire}^{0.6} * Pr_{aire}^{0.36} * \left(\frac{Pr_{aire}}{Pr_s}\right)^{0.25} \quad \text{Ec. 4.76}$$

Pr_s Encontramos a la Temperatura de película¹²⁰ de la siguiente manera:

¹¹⁶ Yunus A. Cengel. Transferencia de Calor. Segunda Edición. Pp. 389. Mc Graw Hill.

¹¹⁷ Yunus A. Cengel. Transferencia de Calor. Segunda Edición. Pp. 390. Mc Graw Hill.

¹¹⁸ Yunus A. Cengel. Transferencia de Calor. Segunda Edición. Tabla 7.2. Pp. 391. Mc Graw Hill, para arreglos escalonados.

¹¹⁹ Yunus A. Cengel. Transferencia de Calor. Segunda Edición. Tabla 7-2. Pp. 391. Mc Graw Hill.

¹²⁰ Temperatura en la superficie de los tubos, es la media de las temperaturas medias de los fluidos

$$Tm_{aire} = \frac{T_{eaire} + T_{saire}}{2} = 49^{\circ}C \quad \text{Ec. 4.77}$$

$$Tm_{gc} = \frac{T_{egc} + T_{sgc}}{2} = 574.5^{\circ}C \quad \text{Ec. 4.78}$$

$$T_s = \frac{Tm_{aire} + Tm_{gc}}{2} = 311.75^{\circ}C + 273 = 584.25^{\circ}K \quad \text{Ec. 4.79}$$

$$Pr_s = 0.684$$

Entonces Nusselts es:

$$Nu_{aire} = 428.218$$

CALCULO DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR DEL AIRE:

$$h_{aire} = \frac{Nu_{aire} * K_{aire}}{d_o} = 464.495 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad \text{Ec. 4.80}$$

CALCULO DE REYNOLDS PARA LOS GASES DE COMBUSTION:

$$Re_{gc} = \frac{Np * 4 * \dot{m}_{gc} * K_{aire}}{n_{tubos} * \pi * d_i * \mu_{gc}} = 1.9774 \text{ (Flujo Turbulento)} \quad \text{Ec. 4.81}$$

CALCULO DEL NUMERO DE NUSSELT¹²¹ EN LOS GASES DE COMBUSTION:

$$Nu_{gc} = 0.023 * Re_{gc}^{0.8} * Pr_{gc}^{0.3} = 59.078 \quad \text{Ec. 4.82}$$

CALCULO DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR DE LOS GASES DE COMBUSTION:

$$h_{gc} = \frac{Nu_{gc} * K_{gc}}{d_i} = 178.483 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad \text{Ec. 4.83}$$

¹²¹ Fuente Propia

CALCULO DEL COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR:

$$U_o = \frac{1}{R_{total}} = \frac{1}{R_{t_{conv1}} + R_{t_{cond}} + R_{t_{conv2}}}$$

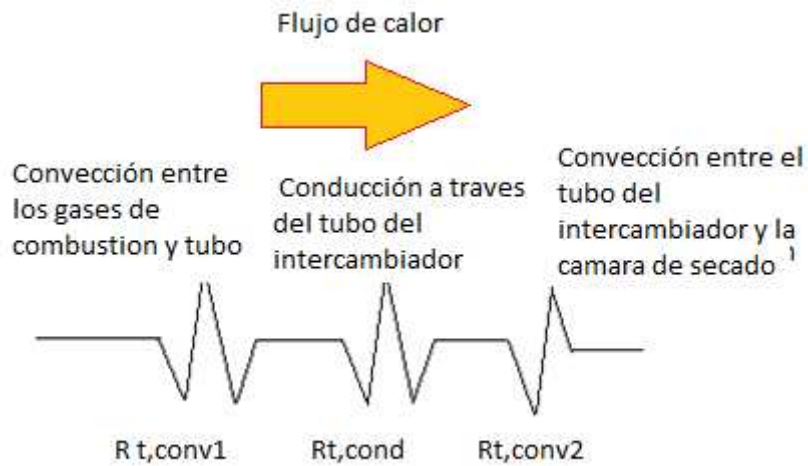


Figura 4. 19 Esquema de la Analogía eléctrica

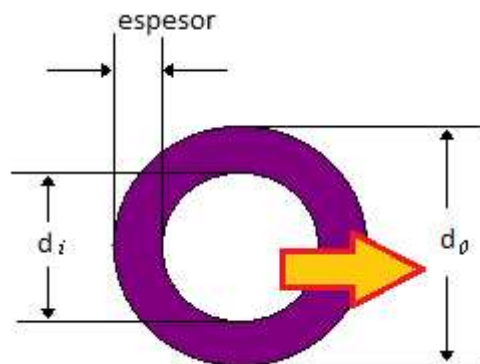


Figura 4. 20 Pared del tubo de Intercambiador de calor

Formula desarrollada del Coeficiente global de transferencia de calor:

$$U_o = \frac{1}{\frac{d_o}{d_i h_{gc}} + \frac{d_o}{d_i} R_{d_{gc}} + \frac{d_o \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)}{2k} + R_{d_{aire}} + \frac{1}{h_{aire}}}$$

Ec. 4.84

Disponemos de todos los datos excepto de los Factores de Obstrucción¹²²

Para los gases de Combustión; $R_{di} = 0.001761 \frac{m^2 \cdot ^\circ K}{W}$

Para el aire; $R_{do} = 0.000352 \frac{m^2 \cdot ^\circ K}{W}$

Entonces

$$U_o = 57 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K}$$

Con este nuevo valor volvemos a ingresar en lugar de $37 \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K}\right)$ asumido al inicio, y obtenemos un nuevo valor de $57 \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K}\right)$, lo cual de acuerdo a las iteraciones respectivas y con nuestro diseño, concluimos que es válido el diseño del intercambiador de calor y cumple con las anotaciones respectivas antes asumidas.

Presentamos una tabla de resultados con las iteraciones respectivas concluyendo y validando nuestro diseño.

Tabla 4.28 Iteraciones del coeficiente global de transferencia de calor

Q (w)	Valor Asumido	A (m ²)	n _{tubos}	NL	NT	Np	Valor Final
	U _o ($\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K}$)						U _o 1 ($\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K}$)
485000	37	30.55	68	17	4	1	57
485000	57	19.83	44	11	4	1	57

CALCULO DE LAS CAIDAS DE PRESION:

Factor de fricción¹²³; $f=0.3$

¹²² Kern Donald. Procesos de Transferencia de Calor. Decima sexta Edición. Tabla 12. Pp. 950 México. Cia. Editorial Continental S.A

Factor de Corrección;

$$X=1.1$$

$$\Delta P = \frac{NL * f * X * \rho_{aire} * V_{max_{aire}}^2}{2} = 39.454 \text{ Pa} = 0.0057 \text{ PSI} \quad \text{Ec. 4.85}$$

4.4.3 EFICIENCIA DE LA CAMARA DE SECADO

La eficiencia teórica de la cámara del secador se obtiene a partir de los datos y resultados obtenidos.

$$\eta_T = 100 \left(\frac{Q_{cea}}{Q_t} \right) \quad \text{Ec. 4.86}$$

Calculo del calor suministrado para el proceso

$$Q_t = Q \cdot t + Q_o \cdot t_{ea} + Q_{p_{gc}}(t_{ea} + t) \quad \text{Ec. 4.87}$$

Calculo de la potencia de operación

$$Q_o = Q_{aireep} + Q_{ea} + Q_p \quad \text{Ec. 4.88}$$

$$Q_p = Q_{p_{cs}} + Q_{p_{cc}} \quad \text{Ec. 4.89}$$

$Q_{p_{cs}} = 12633.831$	W	Potencia de pérdidas en la cámara de secado
$Q_{p_{cc}} = 8942.901$	W	Potencia de pérdida en la cámara de combustión
$Q_p = 21576.732$	W	Potencia de pérdidas

$$Q_o = Q_{aireep} + Q_{ea} + Q_p$$

$Q_{aireep} = 91577$	W	Potencia para calentar el aire de reposición
$Q_{ea} = 46811$	W	Potencia para evaporar el agua
$Q_p = 21576.732$	W	Potencia de pérdidas
$Q_o = 159965$	W	Potencia de operación

¹²³ Yunus A. Cengel. Transferencia de Calor. Segunda Edición. Figura 7-27B, Pp. 393. Mc Graw Hill

Calculo de pérdidas en los gases de escape

$$Q_{p_{gc}} = \dot{m}_{gc} * CP_m * (T_{S_{gc}} - T_a)$$

$\dot{m}_{gc} = 0.46$	kg/s	Caudal másico de los gases de combustión
$CP_m = 1251.17$	J/kg.C	Calor específico de la mezcla de los gases
$T_{S_{gc}} = 195$	C	Temperatura de salida de los gases de combustión
$T_a = 23$	C	Temperatura ambiente
$Q_{p_{gc}} = 98992.57$	W	Pérdidas en los gases de combustión

$$Q_t = Q \cdot t + Q_o \cdot t_{ea} + Q_{p_{gc}}(t_{ea} + t)$$

η_T	%	Eficiencia teórica del secador
Q_{cea}	J	Calor utilizado para evaporar el agua
Q_t	J	Calor total suministrado para el proceso de secado
$Q = 485610$	W	Potencia de arranque
$Q_o = 159965$	W	Potencia de operación
$Q_{p_{gc}} = 98992.57$	W	Perdida en los gases de combustión
$t = 28800$	s	Tiempo de calentamiento
$t_{ea} = 432000$	s	Tiempo para evaporar el agua

$$Q_t = 1.22 \times 10^{11} \quad \text{J}$$

$$Q_{cea} = Q_{ea} \times t_{ea} \quad \text{J}$$

$$Q_{cea} = 46811 \times 432000$$

$$Q_{cea} = 2.02 \times 10^{10} \quad \text{J}$$

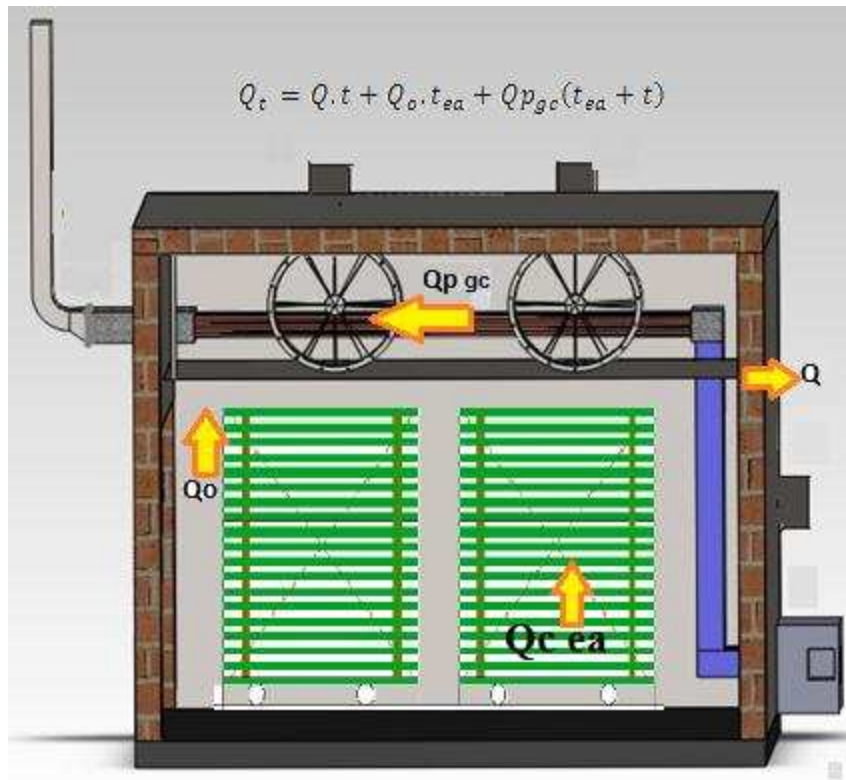


Figura 4. 21 Esquema de los Calores en la Cámara de Secado

Calculo de la eficiencia¹²⁴

$$\eta_T = 100 \left(\frac{Q_{c_{ea}}}{Q_t} \right) \quad \text{Ec. 4.90}$$

$$\eta = 100 \left(\frac{Q_{c_{ea}}}{Q_t} \right)$$

$$\eta = 17 \%$$

La eficiencia de una cámara de secado está limitada por las características de fabricación de dicha cámara de secado, esto hace que se produzcan determinadas pérdidas de calor, que producen una disminución de la eficiencia y por lo tanto el secador de madera no entrega el 100 % de su rendimiento como sería en un caso ideal, sino que tiene un rendimiento menor en nuestro caso del 17%.

¹²⁴ Bonilla, Isaac. Montenegro, Fernando. Diseño de un secador de madera. Tesis, ESPE. Quito.

La eficiencia obtenida en otro tipo de secadores: “Los secadores solares expuestos pueden ser operacionales a eficiencias muy bajas (menores que un 5%), aunque la eficiencia de los secadores muy baratos como los secadores de biomasa puede incrementarse hasta valores reales superiores a un 15 %” ¹²⁵, existen parámetros de diseño que nos impiden una óptima comparación de la eficiencia pero si nos reflejan que nuestro secador esta con una eficiencia aceptable.

Existen consideraciones de diseño que impiden una eficiencia teórica mayor para nuestro secador. Así, las indeseables pérdidas de energía, por conducción y convección, reducen drásticamente el rendimiento del secador. Pero estas pérdidas de rendimiento se pueden suprimir en parte mediante nuevos diseños, materiales más avanzados, mejores aislantes, haciendo que se acerque el rendimiento de la máquina real al de la máquina de Carnot.

4.4.4 CHIMENEA

Es un sistema usado para evacuar gases calientes, como norma general son completamente verticales para asegurar que los gases calientes puedan fluir sin problemas.

A la corriente de aire que origina el fuego y que hace que el humo ascienda por la chimenea se le denomina "tiro", y en nuestro caso es tiro forzado, ya que interviene el ventilador centrifugo.

Para el cálculo del área de la sección transversal del conducto nos ayudamos de la siguiente formula:

$$^{126} Q = C * A * \sqrt{2 * g * H \left(\frac{Tm_{gc} - Ts_{gc}}{Tm_{gc}} \right)} \quad \text{Ec. 4.91}$$

Q = 0.58 m³/s Caudal volumétrico de humo en la chimenea

A = 0.12 m² Área de la sección transversal del conducto

¹²⁵ Tecnología Química Vol. XXVIII, No. 2, 2008

www.uo.edu.cu/ojs/index.php/tq/article/viewFile/2470/2000 pág. 40

¹²⁶ <http://www.uclm.es/profesorado/jvillasenor/esp/contatm/tema5-chimeneas.pdf>

$C = 0.67$		Coeficiente de descarga (0.65 a 0.70)
$g = 9.81$	m/s^2	Aceleración de la gravedad
$H = 6$	m	Altura de la chimenea
$T_{m_{gc}} = 662$	$^{\circ}K$	Media de la temperatura de los gases
$T_{s_{gc}} = 370$	$^{\circ}K$	Temperatura externa e inferior

4.5. SISTEMA DE HUMECTACION

Es el encargado de elevar la humedad en el ambiente para que pueda abrir los poros superficiales de la madera y así permitir la evacuación del agua que se encuentra al interior de la misma.

Está compuesto por tubería de acero galvanizado de diámetro $\frac{1}{2}$ plg, en la cual se coloca atomizadores para esparcir líquidos pulverizándolos en partículas muy pequeñas.

4.6. SISTEMA DE CONTROL

En forma automática, se encarga de activar los sistemas de ventilación, calefacción y humidificación para mantener cuidadosamente los niveles impuestos de temperatura y humedad para el proceso de secado, por medio de electrodos que se encuentran insertos en algunas tablas y en la cámara de secado, los mismos que estarán conectados entre sí y además con el respectivo tablero de control en el exterior de la cámara, para así medir la humedad y la temperatura y de esta manera controlar y visualizar la situación al interior de la cámara de secado.

Sin embargo, es necesaria regular la programación de acuerdo a los requerimientos de temperatura y humedad en forma periódica y de acuerdo con las tablas de secado seleccionadas, para un eficiente secado.

DIAGRAMA DE CONTROL

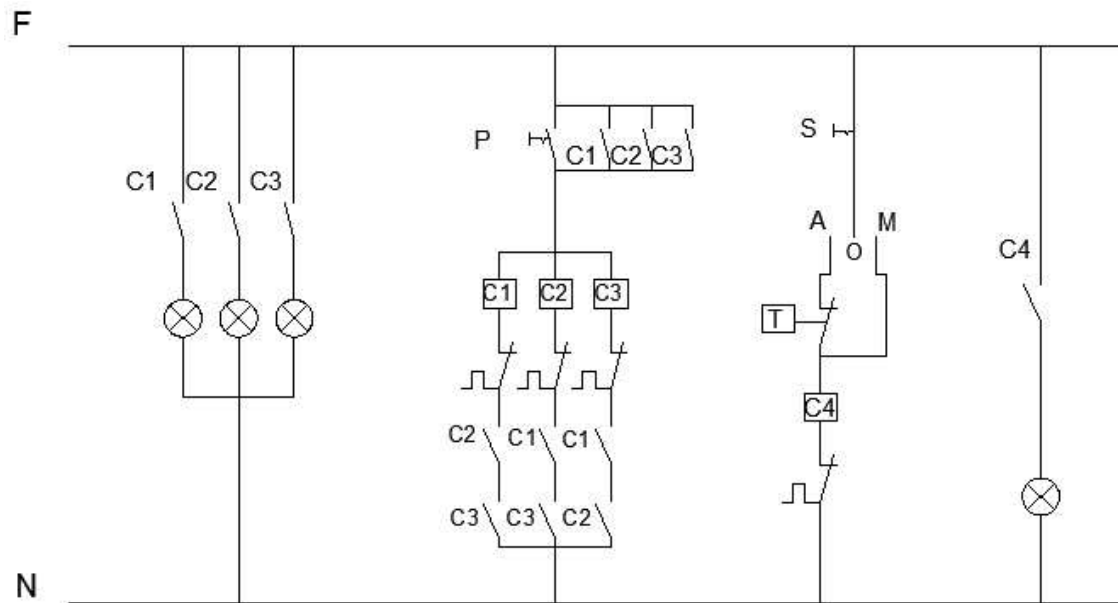
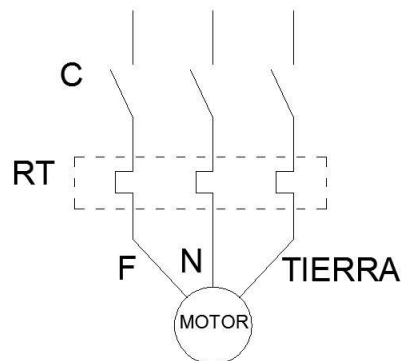


DIAGRAMA DE POTENCIA



NOMENCLATURA

C1, C2, C3

C4

T

S

P

Cable #18 de Asbesto

VENTILADORES AXIALES

VENTILADOR CENTRÍFUGO

TERMOSTATO DE ALTA TEMPERATURA

RELE TERMICO (RT)

SELECTOR 3 POSICIONES

PULSADOR DE BOTONERA ON-OFF

CONEXIÓN ENTRE TERMOSTATO Y
CONTACTOR

4.7. ELABORACION DE PLANOS PARA LA CONSTRUCCION

Planos de construcción Anexo A.

CAPÍTULO V

DIAGRAMA DE PROCESOS Y SIMULACION

5.1 DIAGRAMAS DE PROCESO

A continuación se realiza una descripción general de los pasos que se deben seguir, para la construcción del secador de 43 metros cúbicos.

5.1.1. CAMARA DE SECADO

- Preparar y nivelar el piso en donde se va a construir el secador.
- Fundir las zapatas, cadenas de amarre y las columnas.
- Construir las paredes de ladrillo y enlucir en su parte interior.
- Fundir la losa del techo dejando las 4 aberturas para las ventilas.
- Fundir la losa del piso con los perfiles L, que constituyen los rieles sobre los cuales se deslizan los coches. Dejar una pendiente del 1% hacia los canales de drenajes y obtener una superficie lo más lisa posible.
- Colocar la estructura del techo falso y sujetar la plancha de aluminio con pernos ¼ NF.
- Colocar las puertas con sus respectivos cauchos en forma de C para hacer un buen sello.
- En cada una de las ventilas colocar su dámper manual.
- Colocar una escalera solidaria a la cámara de secado, para que el operador pueda subir al techo y maniobrar las ventilas.

5.1.2. SISTEMA DE VENTILACION

- Colocar los ventiladores en el techo, con un caucho intermedio para evitar la vibración excesiva. Sujetarlos con pernos Hilti de ½ pulgada y con refuerzos desde el marco del ventilador hasta la losa.
- Es importante observar la correcta instalación del ventilador y de sus aletas.

5.1.3. SISTEMA DE CALEFACCION

- Hacer los agujeros para alojar los tubos del intercambiador de calor en la pared de la cámara de secado.
- Colocar los tubos y sujetadores con templadores hasta la losa del secador.
- Colocar los tubos de conducción de los gases, la chimenea sujetar mediante templadores.
- Fundir las columnas de la cámara de combustión.
- Construir el piso de la cámara de combustión con doble fila de ladrillos.
- Construir las paredes de la cámara de combustión, dejando las guías para la puerta de acero por donde se introducen los trozos de madera, la apertura para el ducto de alimentación del aserrín y el ducto para la entrada del aire en exceso.
- Instalar la base para el ventilador centrífugo y colocarlo.

5.1.4. SISTEMA DE HUMECTACION

- Instalar la tubería de acero galvanizado diámetro ½ plg. formando un ramal antes del intercambiador de calor.
- Colocar a un 1 metro de distancia los nebulizadores.

5.1.5. SISTEMA DE OPERACIÓN.

- Colocar el tablero de control
- Colocar el termo higrómetro, dejando su sensor dentro de la cámara de secado.
- Colocar el termostato.
- Colocar la botonera. La luz encendida indica que los ventiladores de la cámara están en funcionamiento.
- Colocar las borneras, una dentro de la cámara de secado y otra en el tablero de control.
- Realizar la instalación eléctrica del motor de cada ventilador, deben tener su respectivo contactor y relé térmico.

5.2. DIAGRAMAS DE CONSTRUCCION

A continuación se presenta un diagrama de construcción y montaje que puede ser tomado como base para la implementación del secador de madera. Los diagramas del proceso de fabricación de los diferentes elementos hacen una descripción de la forma más lógica y fácil de construcción de las partes que conforman el secador.

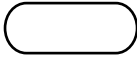





	FIN OPERACION
	OPERACIÓN
	INSPECCION
	TRANSPORTE
	DEMORA
	CONECTOR

Figura 5. 1 Simbologías utilizadas en el diagrama de construcción.

SISTEMAS

Tabla 5.1 Código de materiales sistemas

DESCRIPCION	CODIGO
Cámara de Secado	C.S
Sistema de Ventilación	S.V
Sistema de Calefacción	S.C
Sistema de Humectación	S.H
Cámara de Combustión	C.C
Sistema de Control	S.CT

CODIGO DE LOS MATERIALES DE LA CAMARA DE SECADO

Tabla 5.2 Código de materiales de la cámara de secado

MATERIAL	CARACTERISTICA	CODIGO
Varilla 12 mm	144 m	C.S.01.01
Varilla 8 mm	100 m	C.S.01.02
Alambre galvanizado	20 Kg	C.S.01.03
Ladrillo	500 u	C.S.01.04
Bloque fino	150 u	C.S.01.05
Cemento	40 q	C.S.01.06
Arena	1 volqueta	C.S.01.07

CODIGO DE LOS MATERIALES SISTEMA DE VENTILACION

Tabla 5.3 Código de materiales del sistema de ventilación

MATERIAL	CARACTERISTICA	CODIGO
Ventiladores axiales	Cap. 29000 CFM $\Delta P = 186 \text{ Pa}$	S.V.01.01
Caucho e=4 mm	8 m	S.V.01.02
Pernos hilti 1/2 plg	12 u	S.V.01.03
Cable de eléctrico	12 m	S.V.01.04
□ 1 1/2 x1.2	12 m	S.V.01.05

CODIGO DE LOS MATERIALES SISTEMA DE CALEFACCION

Tabla 5.4 Código de materiales del sistema de calefacción

MATERIAL	CARACTERISTICA	CODIGO
Tubo acero 1"	68 u	S.C.01.01
Espejo Intercambiador	640x349 mm	S.C.01.02
Templadores	90 u	S.C.01.03
Chimenea	400x200 mm	S.C.01.04
Ductos entrada intercambiador	640x300x3360 mm	S.C.01.05
Ductos salida intercambiador	640x300x1200 mm	S.C.01.06
Reductor Ductos salida intercambiador a Chimenea	640x349 a 400x200 mm	S.C.01.07
Ductos Chimenea	400x200x1200 mm	S.C.01.07

CODIGO DEL SISTEMA DE HUMECTACION

Tabla 5.5 Código de materiales del sistema de humectación

MATERIAL	CARACTERISTICA	CODIGO
Bomba	Cap. 1 hp	S.H.01.01
Tubo ½"	12 m	S.H.01.02
Ventilas 450x450 mm	4 u	S.H.01.03
Nebulizadores	6 u	S.H.01.04
Soportes	5 u	S.H.01.05
Cuerda de alambre 4mm	14 m	S.H.01.06

CODIGO DE LOS MATERIALES CAMARA DE COMBUSTION

Tabla 5.6 Código de materiales de la cámara de combustión

MATERIAL	CARACTERISTICA	CODIGO
Ventilador radial	Cap. 1230CFM $\Delta P = 124$ Pa	C.C.01.01
Varilla 8 mm	24 m	C.C.01.02
Alambre galvanizado	5 lb	C.C.01.03
Ladrillo	150 u	C.C.01.04
Puerta acero con aislante	500 x 350 mm	C.C.01.05
Cemento	1 q	C.C.01.06
Arena	3 q	C.C.01.07

CODIGO DEL SISTEMA DE CONTROL

Tabla 5.7 Código de materiales del sistema de control

MATERIAL	CARACTERISTICA	CODIGO
Tablero de control	1 u	S.CT.01.01
Termo higrómetro	1 u	S.CT.01.02
Termostato con sonda 120°	1 u	S.CT.01.03
Botonera	1 u	S.CT.01.04
Luz testigo	1 u	S.CT.01.05
Fuente de alimentación	110 V	S.CT.01.06
Interruptor 3 posiciones	110 V	S.CT.01.07
Borneras	4 u	S.CT.01.08

Diagrama 5.1

DIAGRAMA DE FABRICACION

CAMARA DE SECADO

Tiempo: semanas	No. Operarios: 3	Hoja: 1/1	Observación:
--------------------	---------------------	--------------	--------------

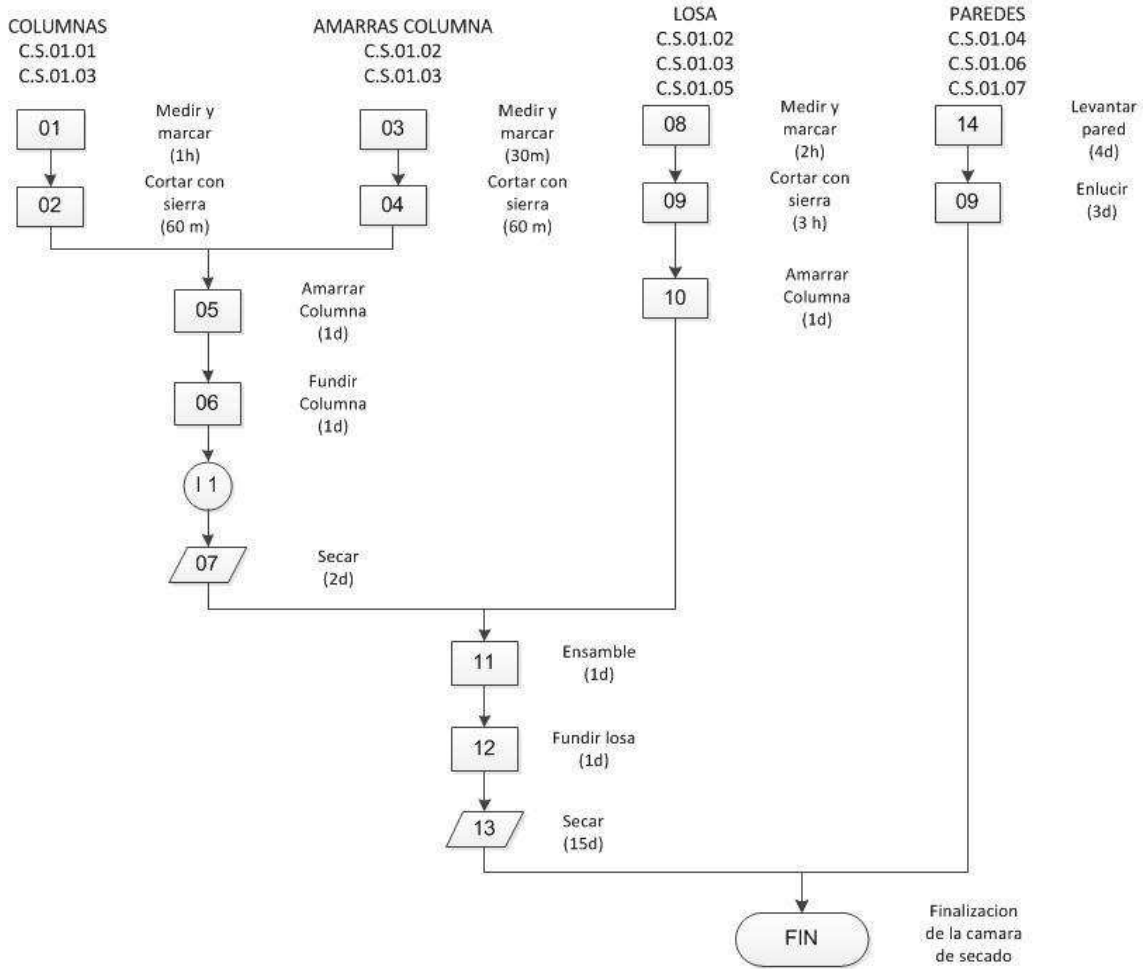


Diagrama 5.2 **DIAGRAMA DE FABRICACION**

DEL SISTEMA DE VENTILACION

Tiempo: semanas	No. Operarios: 3	Hoja: 1/1	Observación:
--------------------	---------------------	--------------	--------------

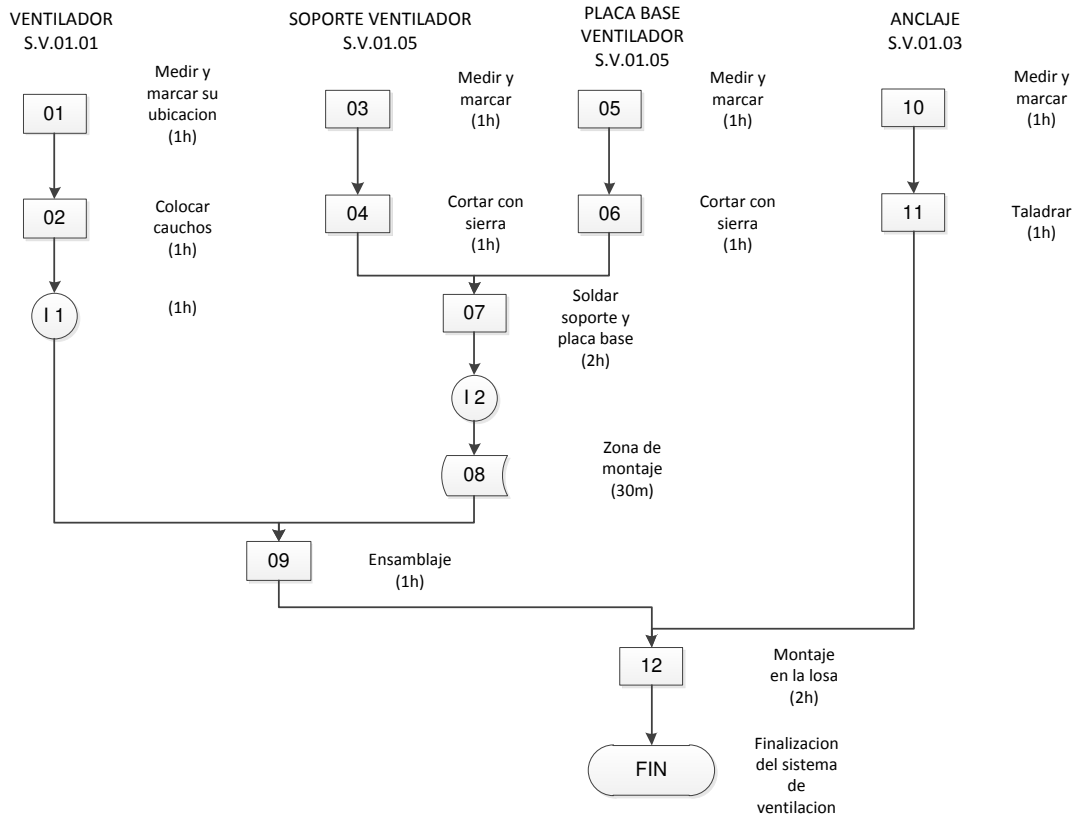


Diagrama 5.3

DIAGRAMA DE FABRICACION

DEL SISTEMA DE CALEFACCION

Tiempo: semanas	No. Operarios: 3	Hoja: 1/1	Observación:
--------------------	---------------------	--------------	--------------

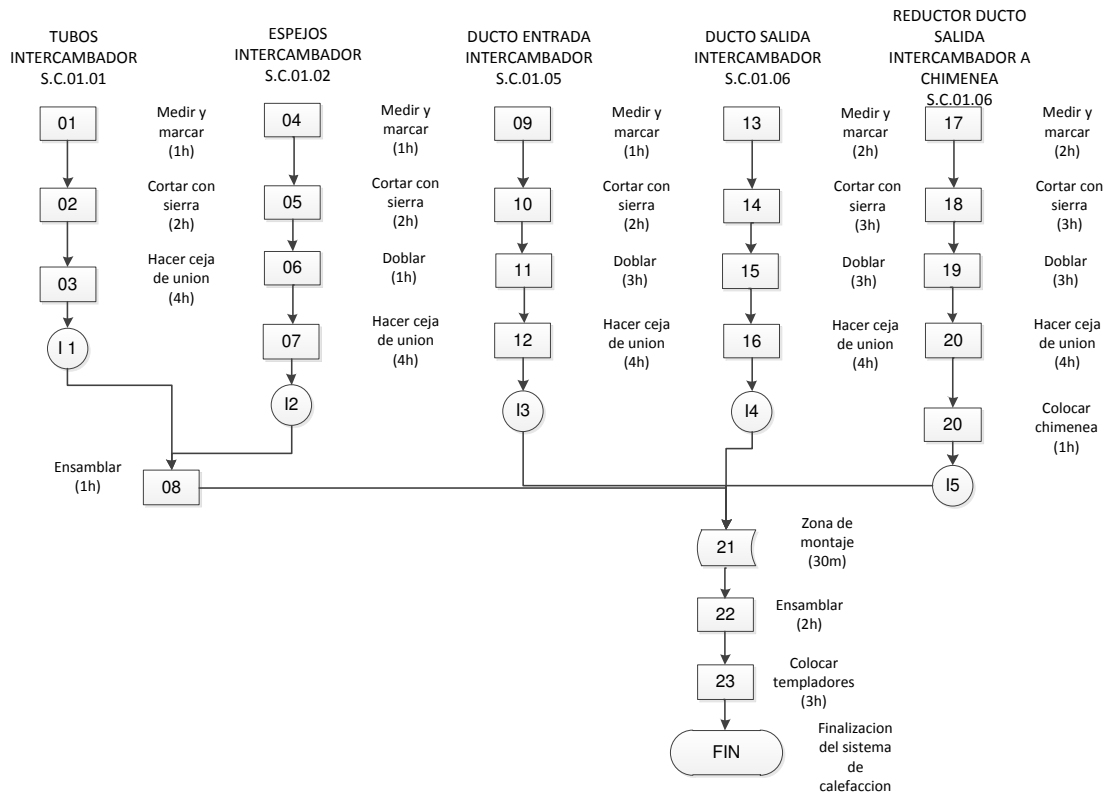


Diagrama 5.4

DIAGRAMA DE FABRICACION

DEL SISTEMA DE HUMECTACION

Tiempo: semanas	No. Operarios: 2	Hoja: 1/1	Observación:
--------------------	---------------------	--------------	--------------

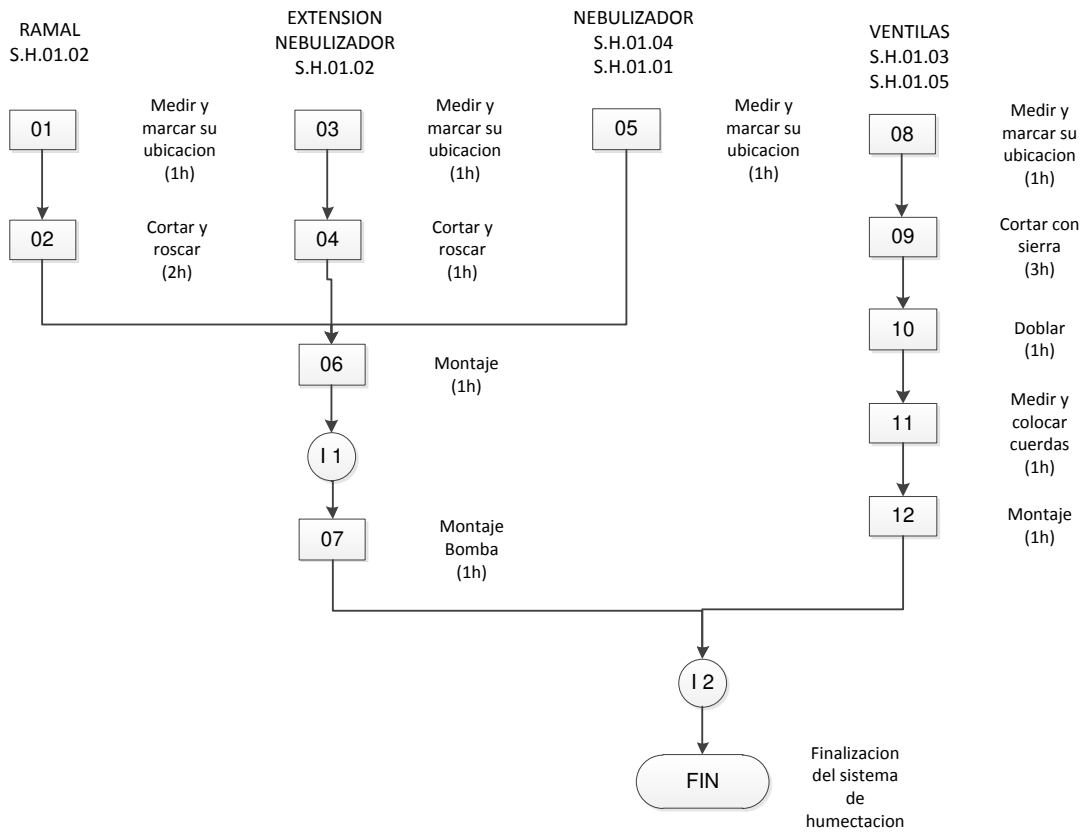
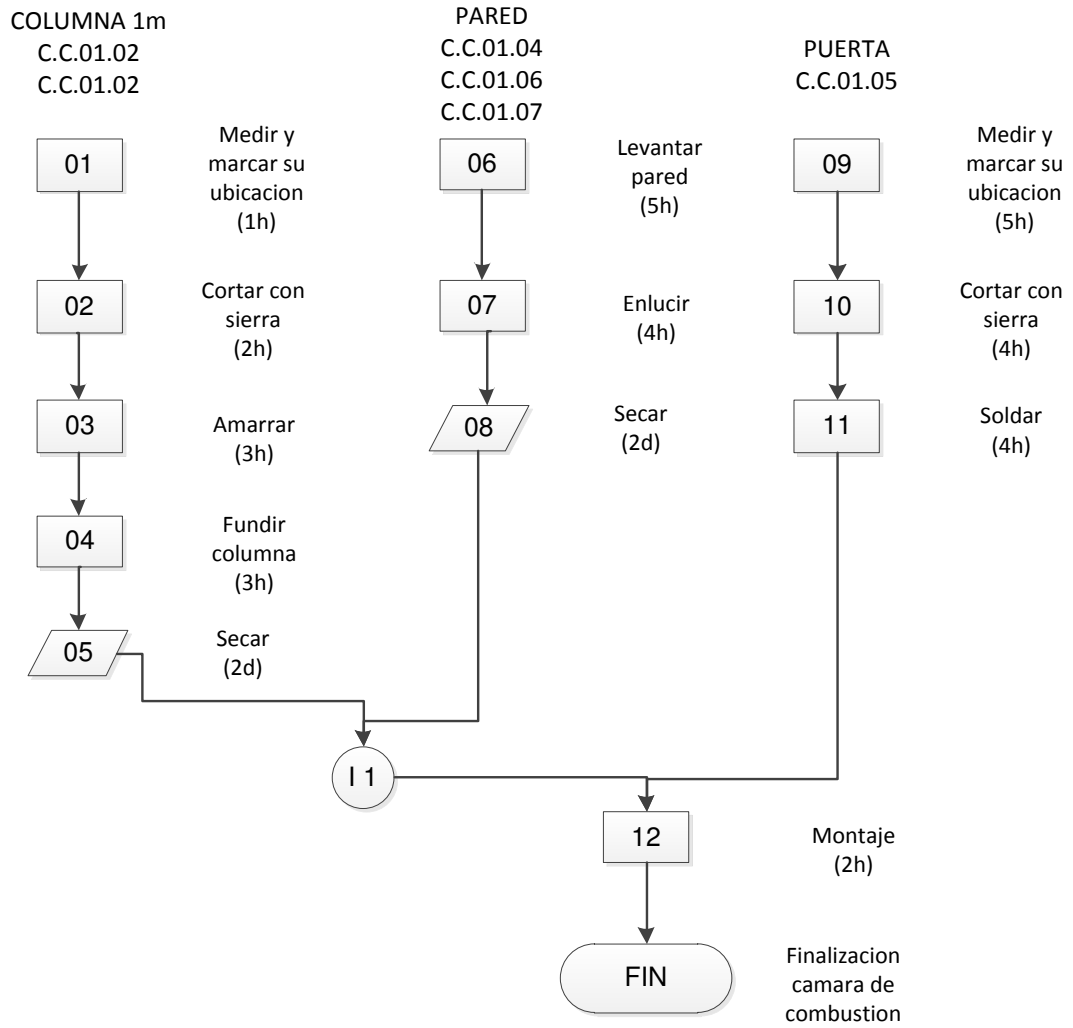


Diagrama 5.5 **DIAGRAMA DE FABRICACION**

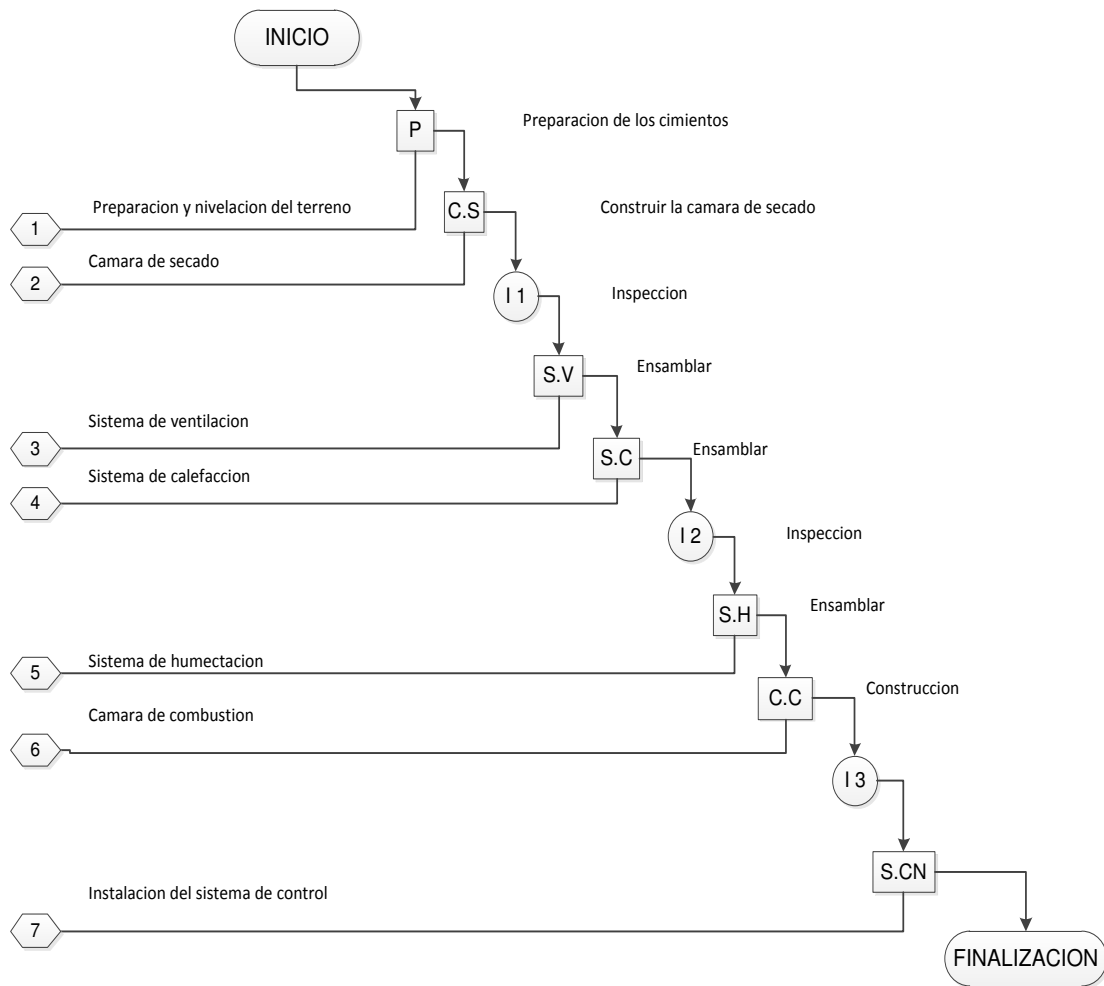
DE LA CAMARA DE COMBUSTION

Tiempo: semanas	No. Operarios: 2	Hoja: 1/1	Observación:
--------------------	---------------------	--------------	--------------



5.3. DIAGRAMAS DE MONTAJE

Diagrama 5.6 DIAGRAMA DE MONTAJE DEL SECADOR			
Tiempo: semanas	No. Operarios: 2	Hoja: 1/1	Observación:



5.4. SIMULACION DEL FUNCIONAMIENTO DEL SECADOR

5.4.1. DESCRIPCIÓN DE ALGOR

Algor es una compañía que se especializa en desarrollar herramientas computacionales para el diseño de elementos y ensambles en un variado campo del análisis mecánico o estructural, en base al análisis de alta tecnología. Algor introdujo el análisis de elementos finitos (FEA) para computadoras en 1984.

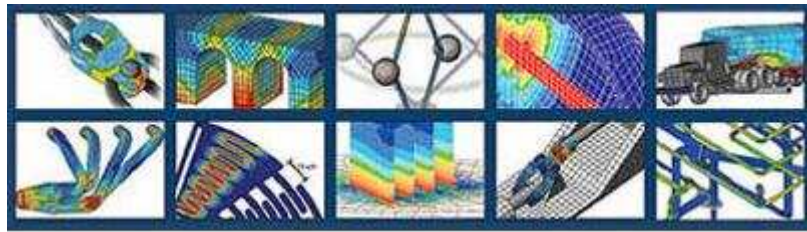


Figura 5. 2 Logotipo de Algor

5.4.1.1. ETAPAS DE PROCESAMIENTO

Para analizar un problema con el Algor, se deben seguir ciertas etapas como: pre procesamiento, procesamiento y post procesamiento.

Para hacer esto, el programa viene dividido en 3 aplicaciones importantes. Una de ellas es el *Superdraw*, en el cual se llevan a cabo todas las actividades de modelado y pre procesamiento en nuestro modelo. La nueva versión de Algor 12.26 tiene además el FEMPRO (FEA Object Editor) en donde es más fácil interactuar con nuestra pieza para agregar condiciones de frontera, propiedades y fuerzas. La etapa de procesamiento es completamente invisible para el usuario, ya que no se tiene acceso a ninguno de los procesamiento de resolución. Finalmente la etapa de post procesamiento la lleva a cabo la aplicación FEMPRO (Superview), en la cual se pueden visualizar los resultados de la simulación.

5.4.1.2. INTERFACES DE ALGOR

Cuando el programa se ejecuta, debemos de saber interactuar con los comandos para poder llevar a cabo un buen proceso. Todas las aplicaciones tienen ambiente Windows y el menú de cada aplicación se describe a continuación, ver Figura 5.3

Al ejecutar Algor FEA abre la interfaz general del programa.

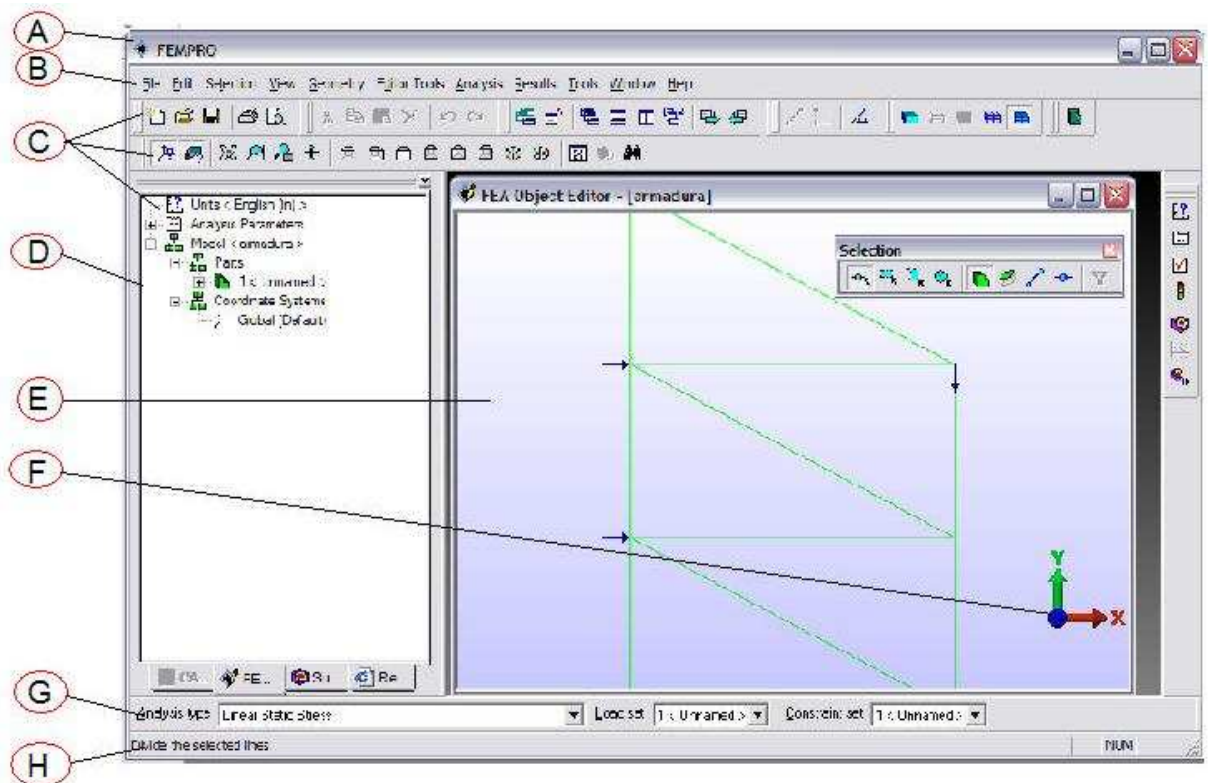


Figura 5. 3 Interfaz de Algor

La interfaz de Algor se compone de los siguientes módulos.

- A. Barra de títulos: Aquí se muestra el nombre del programa y su ubicación.
- B. Barra de menú: Localizada debajo del título, contiene diferentes menús de opciones y herramientas diversas.
- C. Barra de herramientas: Éstas proveen un rápido acceso a los comandos de Algor con ayuda de iconos gráficos.

- D. **Árbol de modelado:** Muestra los parámetros que serán empleados en el análisis. La tabla de interfaz CAD es empleada para importar modelos sólidos. La tabla de edición FEA es dedicada al análisis en sí. La tabla de reporte se aplica para ver los resultados del estudio en formato HTML.
- E. **Espacio de trabajo:** Aquí se lleva a cabo la actividad de modelación. La barra de título de ésta aplicación muestra el componente en uso y el nombre del archivo.
- F. **Mini eje:** Los mini ejes ayudan en la ubicación espacial y las vistas del espacio de trabajo.
- G. **Barra de escenario:** Muestra algunos de los parámetros de diseño así como el paquete empleado para el análisis.
- H. **Barra de estado:** Los mensajes enviados por el sistema son localizados aquí.

5.4.1.3. PROCESO DE MODELADO EN FEMPRO SUPERVIEW.

Para realizar el análisis, lo primero que hay que hacer es introducir el modelo geométrico a ser evaluado. Este puede venir de un archivo CAD generado en uno de los 6 programas soportados (Autocad (Mechanical Desktop), Autodesk, Solid Works, Pro Engineer, Solid Edge y Cad Key), un formato de sólidos universal, un modelo dibujado en Superdraw o un formato no Algor FEA.

5.4.2. SIMULACION DE LA CAMARA DE SECADO

A continuación ingresamos los siguientes datos:

Tabla 5.8 Datos ingresados Cámara de secado.

Element type	Brick
Element definition	Brick térmico
Material	Ceram tec grate 447
Cad Mesh Options	Fine 40%
Surface Convection Loads (inside)	4.843E-006 W/mm ² °C
Inside temperature	75°C
Surface Convection Loads (outside)	5.135E-006 W/mm ² °C
Outside temperature	23°C

MALLADO DE LA CAMARA DE SECADO

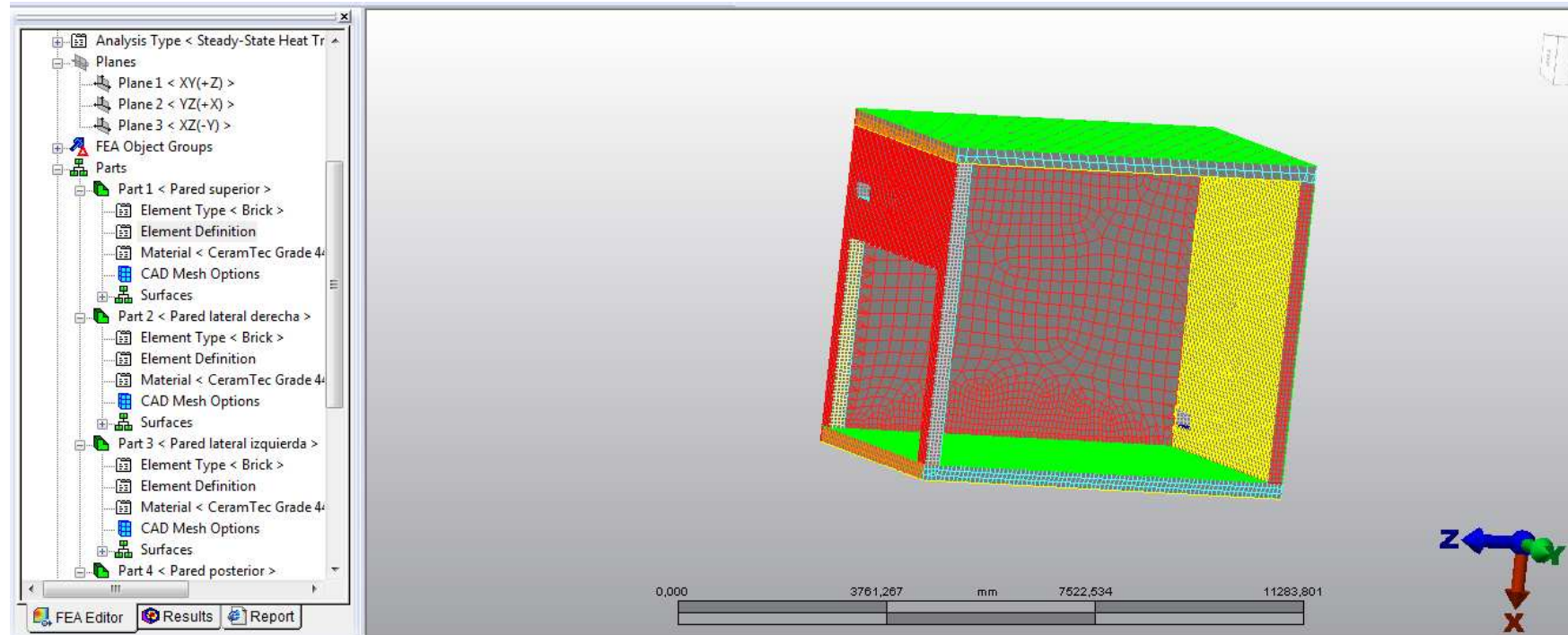


Figura 5. 4 Mallado cámara de secado

RESULTADO CAMARA DE SECADO

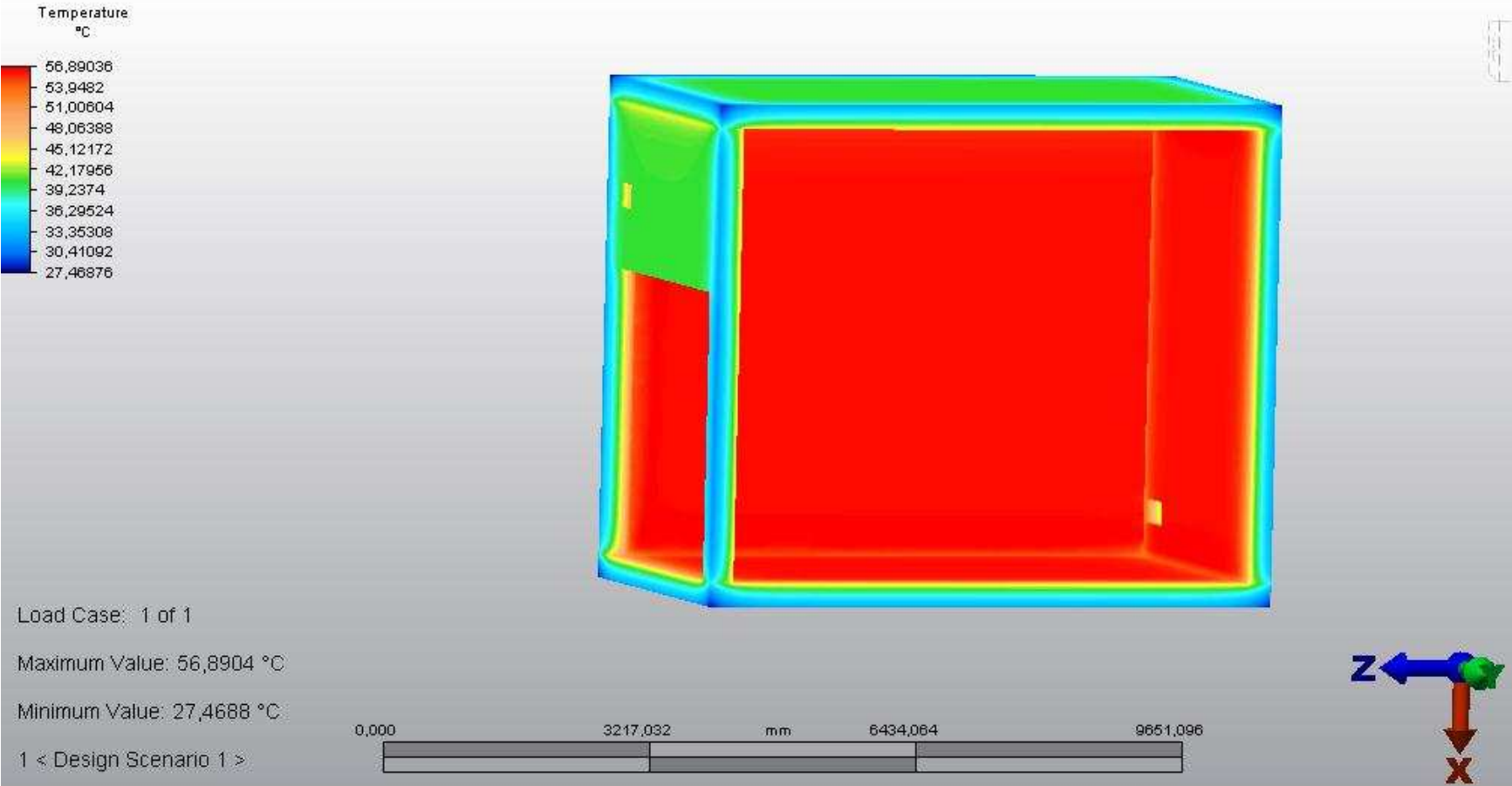


Figura 5. 5 Resultado Cámara de secado- Isometría

RESULTADO CAMARA DE SECADO

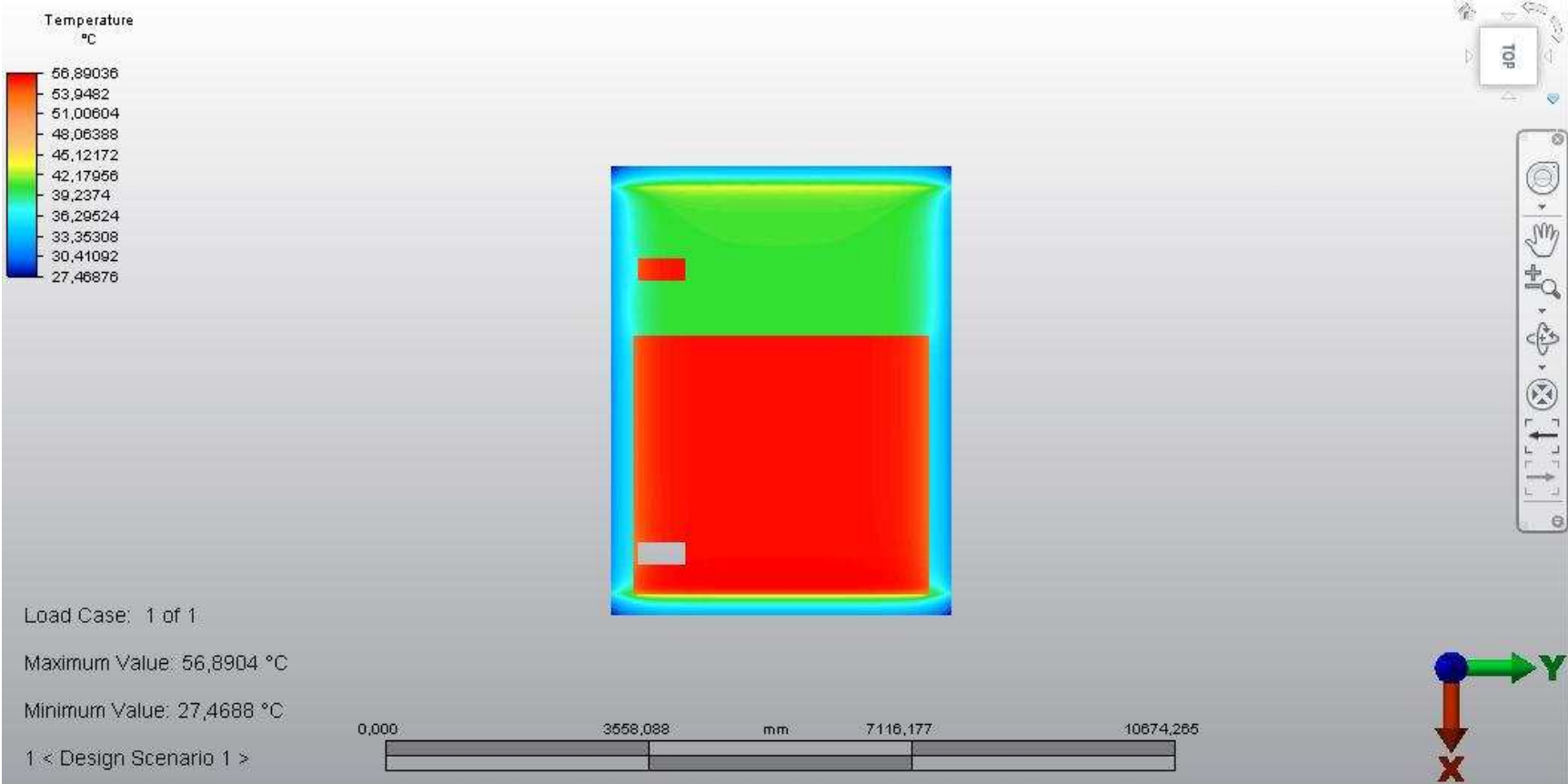


Figura 5. 6 Resultado cámara de secado -Vista frontal

5.4.3. SIMULACION DE LA CAMARA DE COMBUSTION

Tabla 5.9 Datos ingresados Cámara de Combustión

Element type	Brick
Element definition	Brick térmico
Material	Ceram tec grate 447
Cad Mesh Options	Fine 40%
Surface Convection Loads (inside)	9.175E-006 W/mm ² °C
Inside temperature	954 °C
Surface Convection Loads (outside)	1.0677E-005 W/mm ² °C
Outside temperature	23 °C

MALLADO DE CAMARA DE COMBUSTION

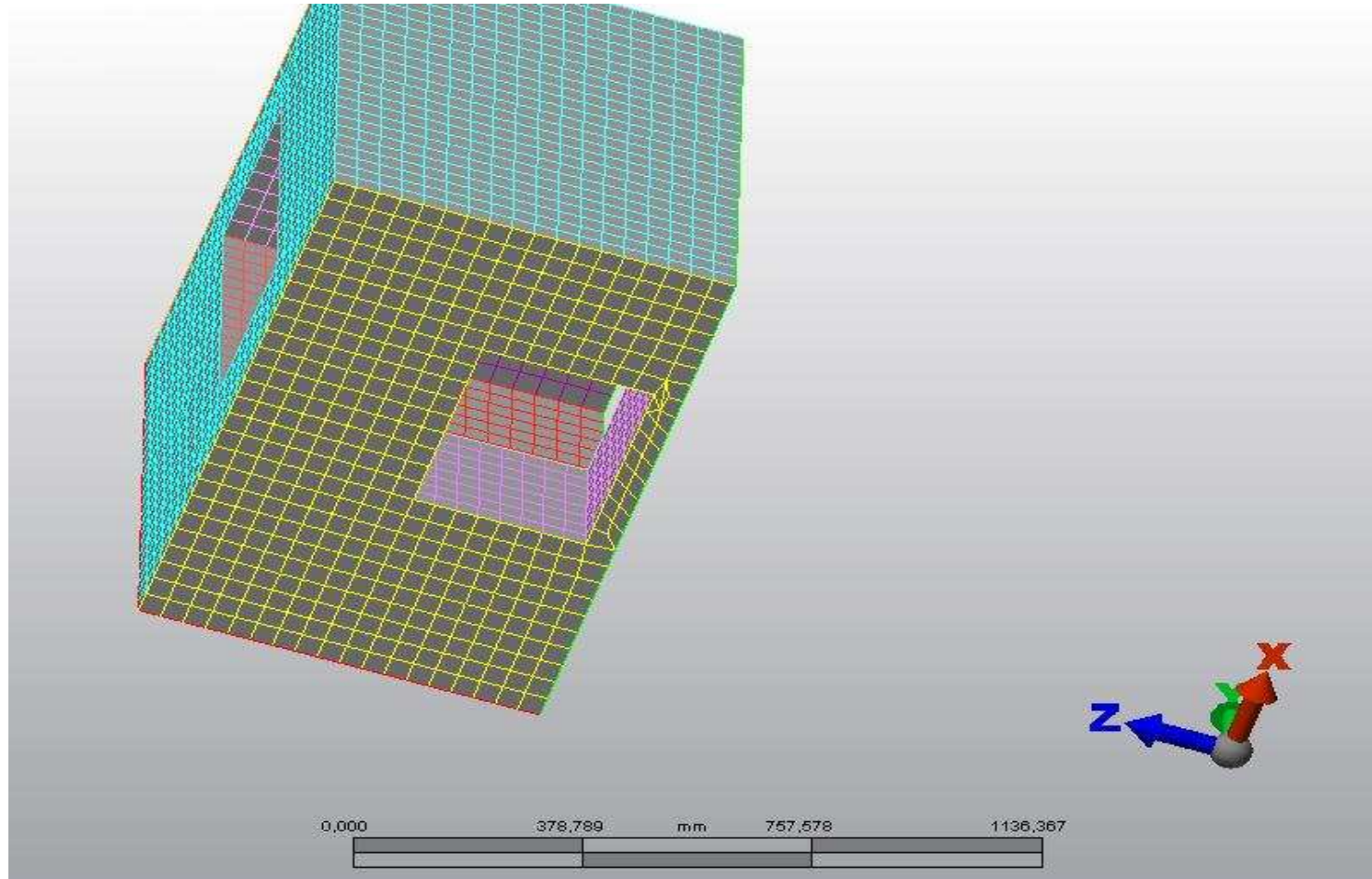


Figura 5. 7 Mallado Cámara de Combustión

RESULTADOS CAMARA DE COMBUSTION

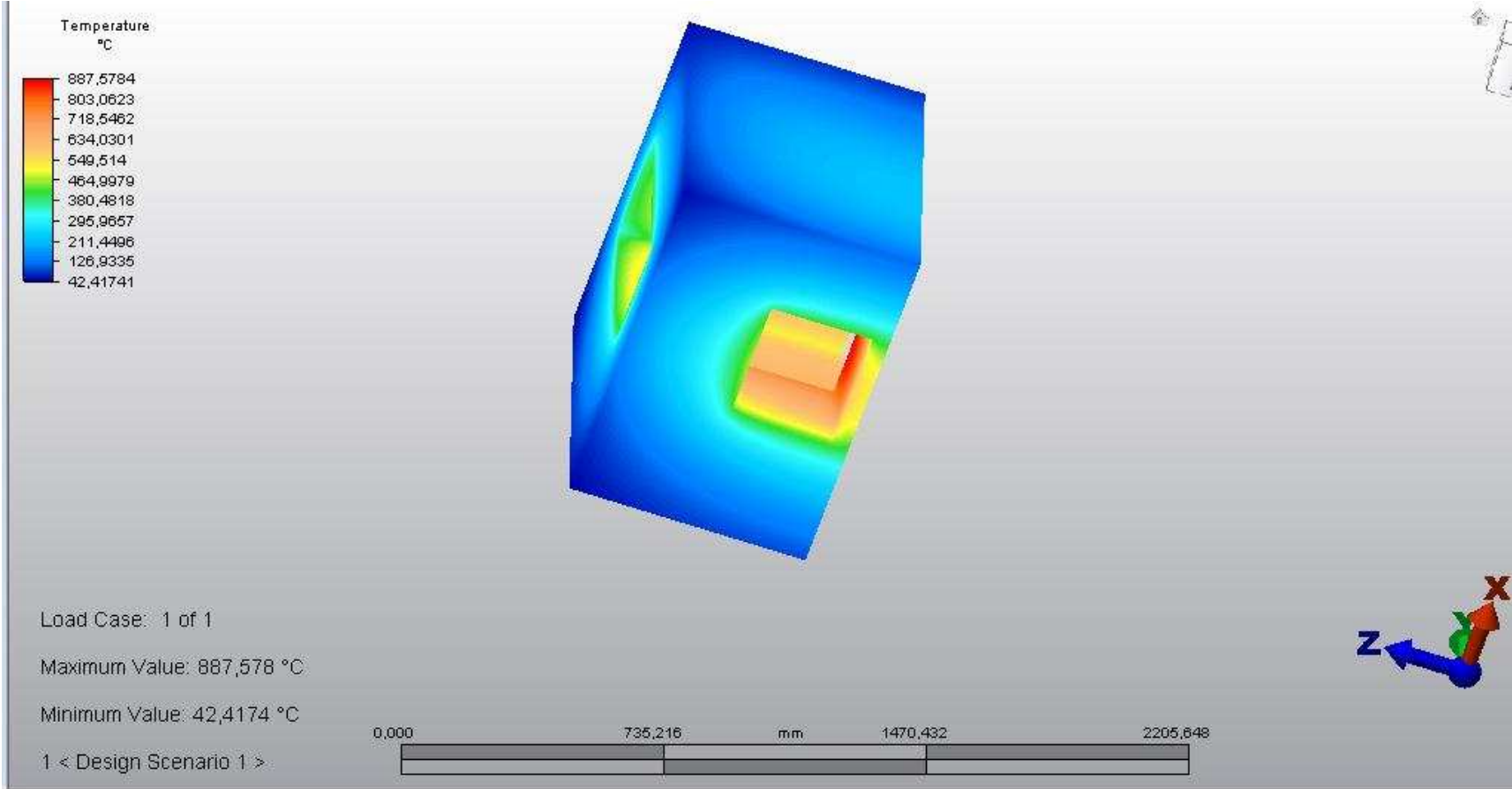


Figura 5. 8 Resultado cámara de combustión - Isometría

RESULTADOS CAMARA DE COMBUSTION

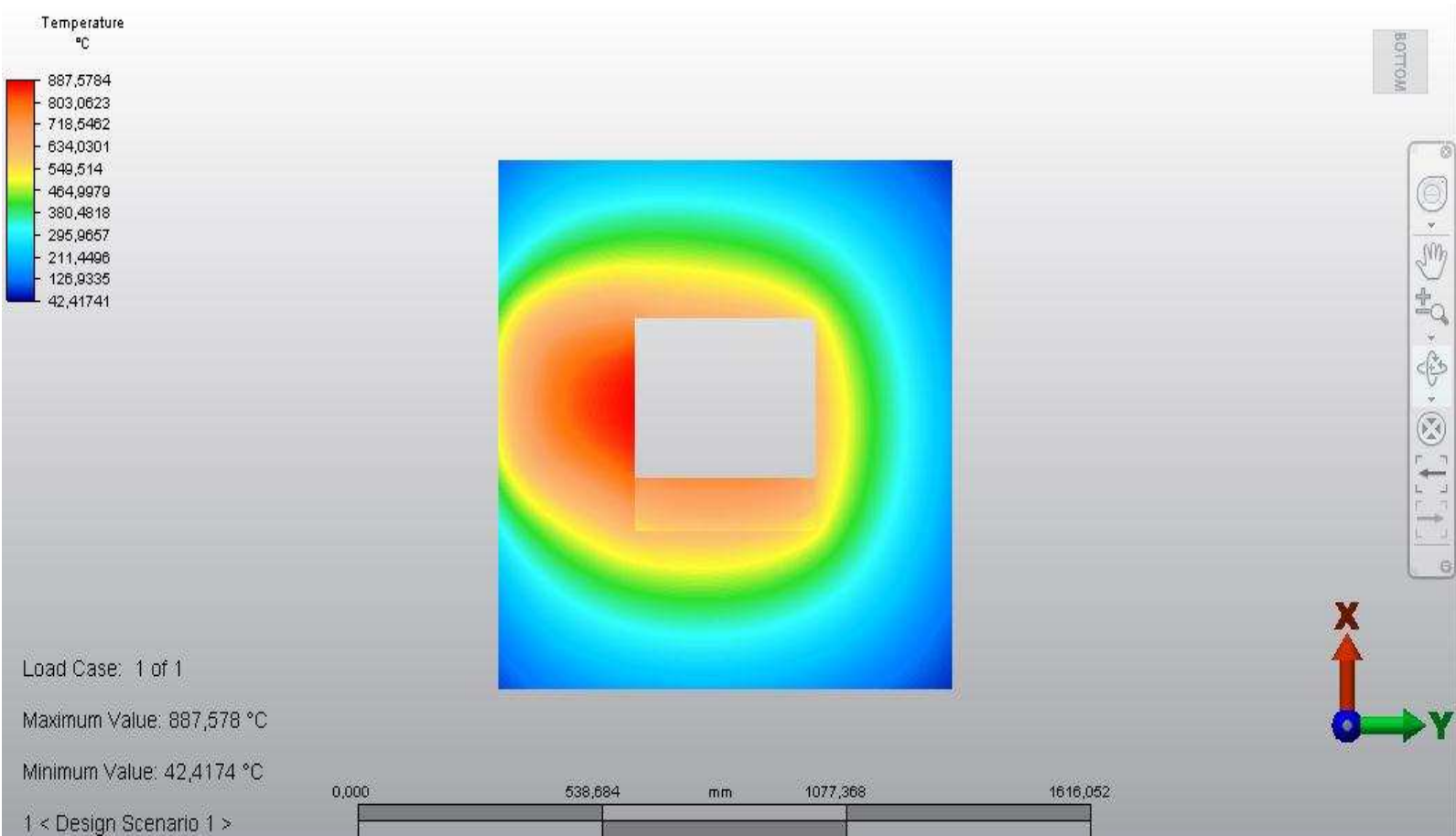


Figura 5. 9 Resultado cámara de combustión - Vista posterior

5.4.4. SIMULACION DEL DUCTO DE LA ENTRADA DE GASES

Tabla 5.10. Datos ingresados del ducto de la entrada de gases

Element type	Brick
Element definition	Brick térmico
Material	AISI type 304 Stainless Steel
Cad Mesh Options	Fine 40%
Surface Convection Loads (inside)	9.175E-006 W/mm ² °C
Inside temperature	422 °C
Surface Convection Loads (outside)	4.843E-006 W/mm ² °C
Outside temperature	75 °C

MALLADO DUCTO DE ENTRADA

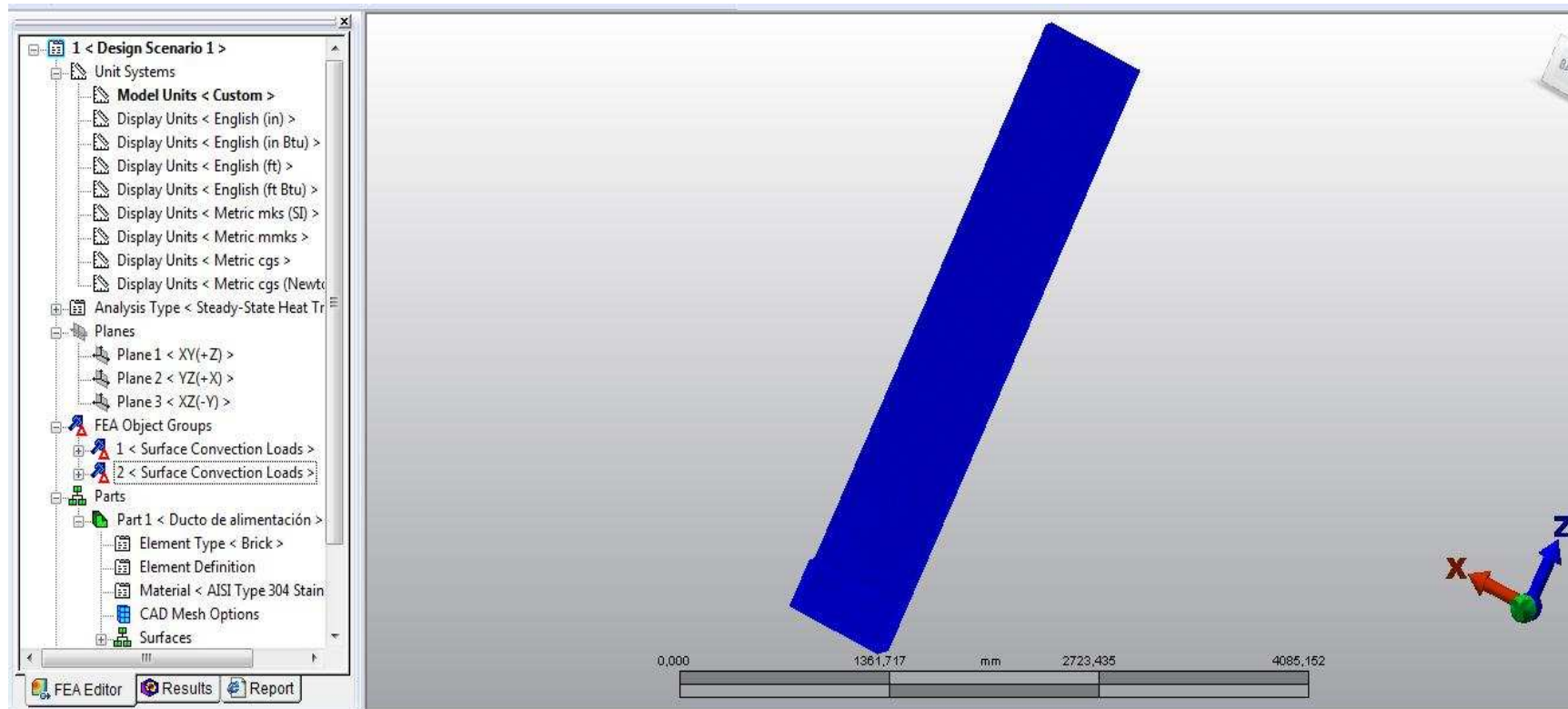


Figura 5. 10 Mallado de ducto de entrada

RESULTADO DUCTO DE ENTRADA

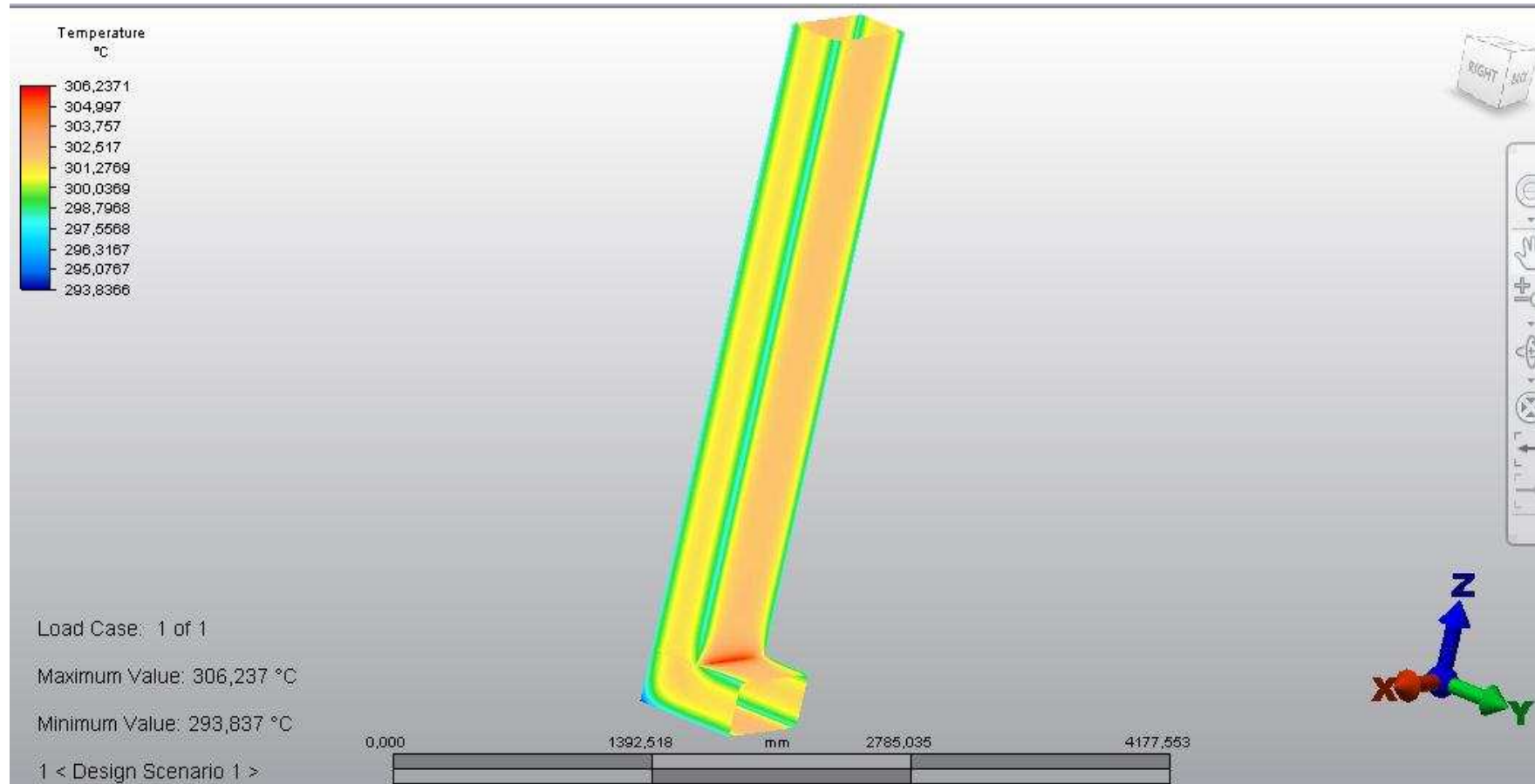


Figura 5. 11 Resultado ducto de entrada - Isometría

RESULTADO DUCTO DE ENTRADA

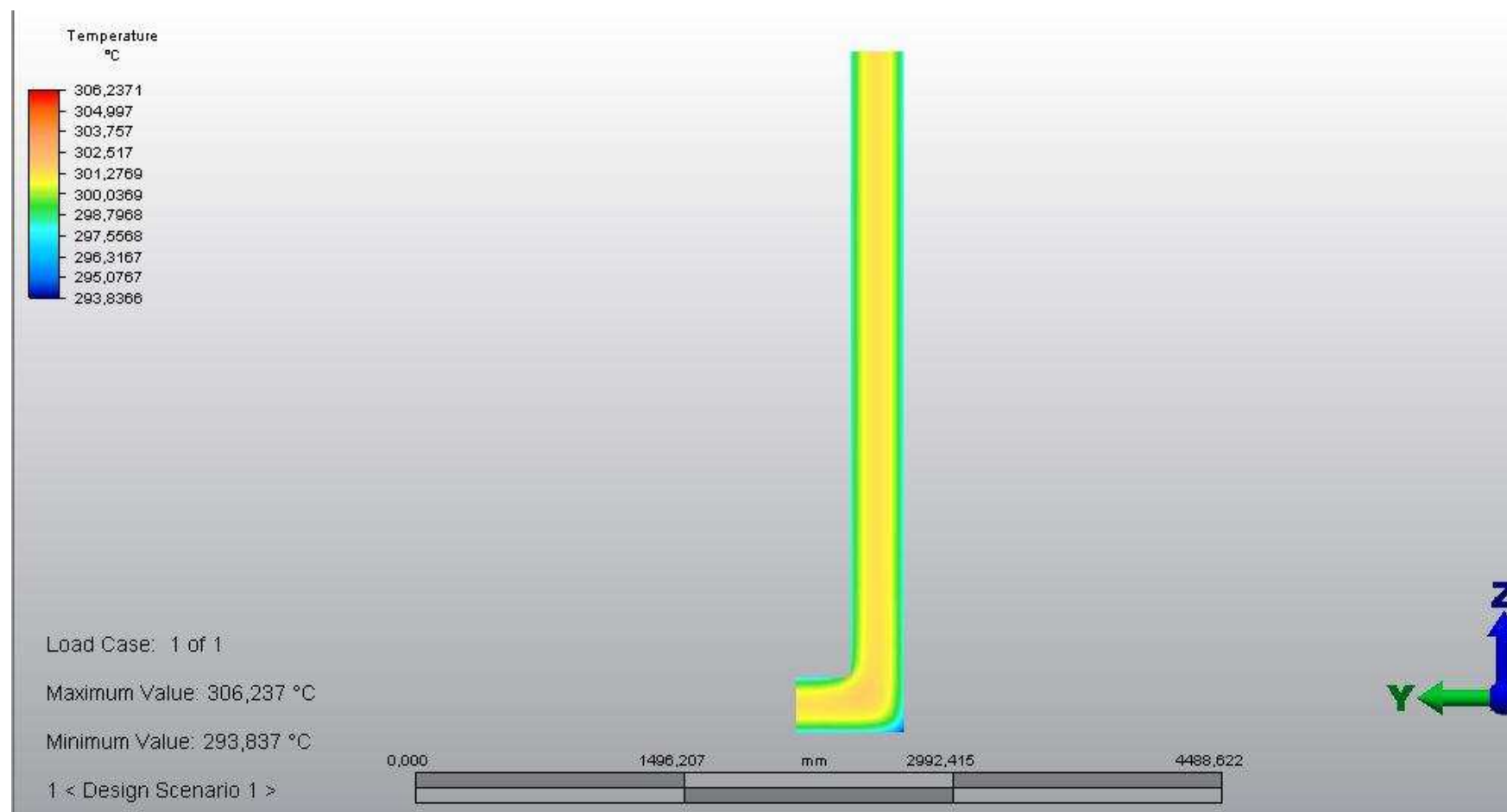


Figura 5. 12 Resultado ducto de entrada - Vista lateral ducto

5.4.5. SIMULACION DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

Tabla 5.11. Datos ingresados del intercambiador de calor.

Element type	Brick
Element definition	Brick térmico
Material	Steel ASTM – A36
Cad Mesh Options	Fine 40%
Surface Convection Loads (inside)	9.175E-006 W/mm ² °C
Inside temperature	322 °C
Surface Convection Loads (outside)	4.843E-006 W/mm ² °C
Outside temperature	75 °C

MALLADO INTERCAMBIADOR DE CALOR

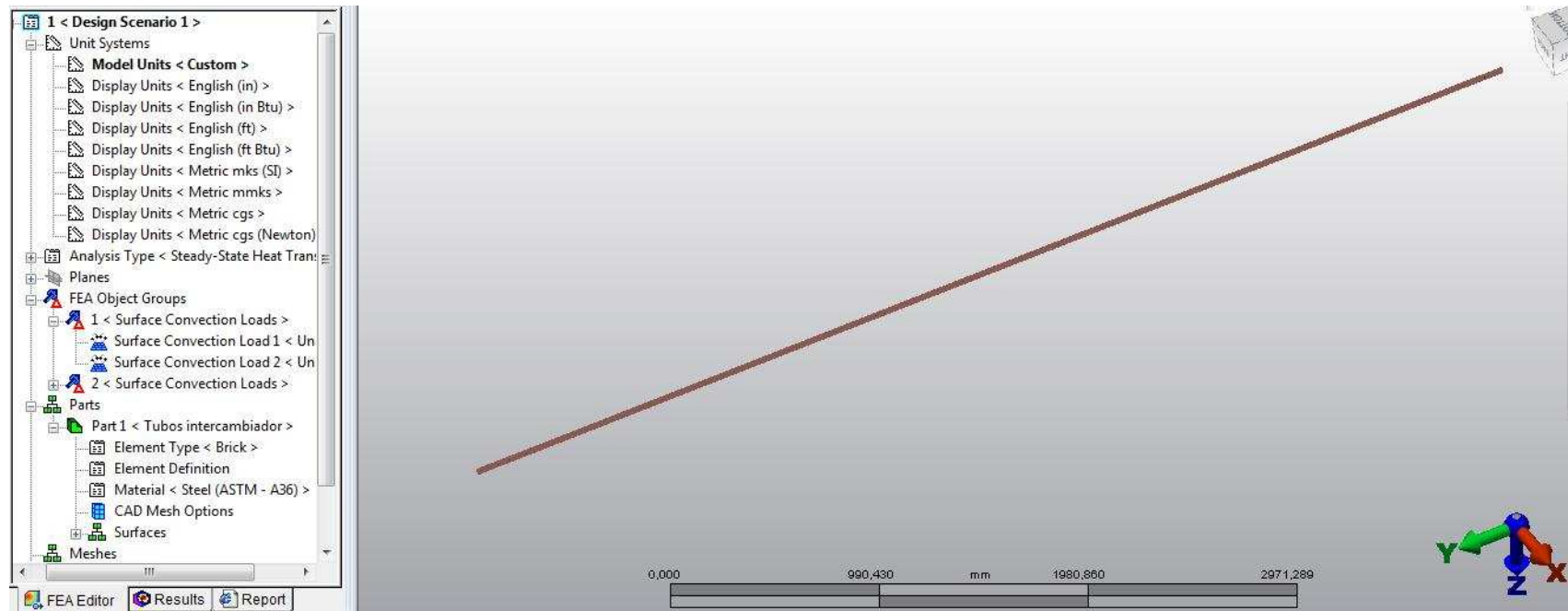


Figura 5. 13 Mallado intercambiador de calor

RESULTADO INTERCAMBIADOR DE CALOR

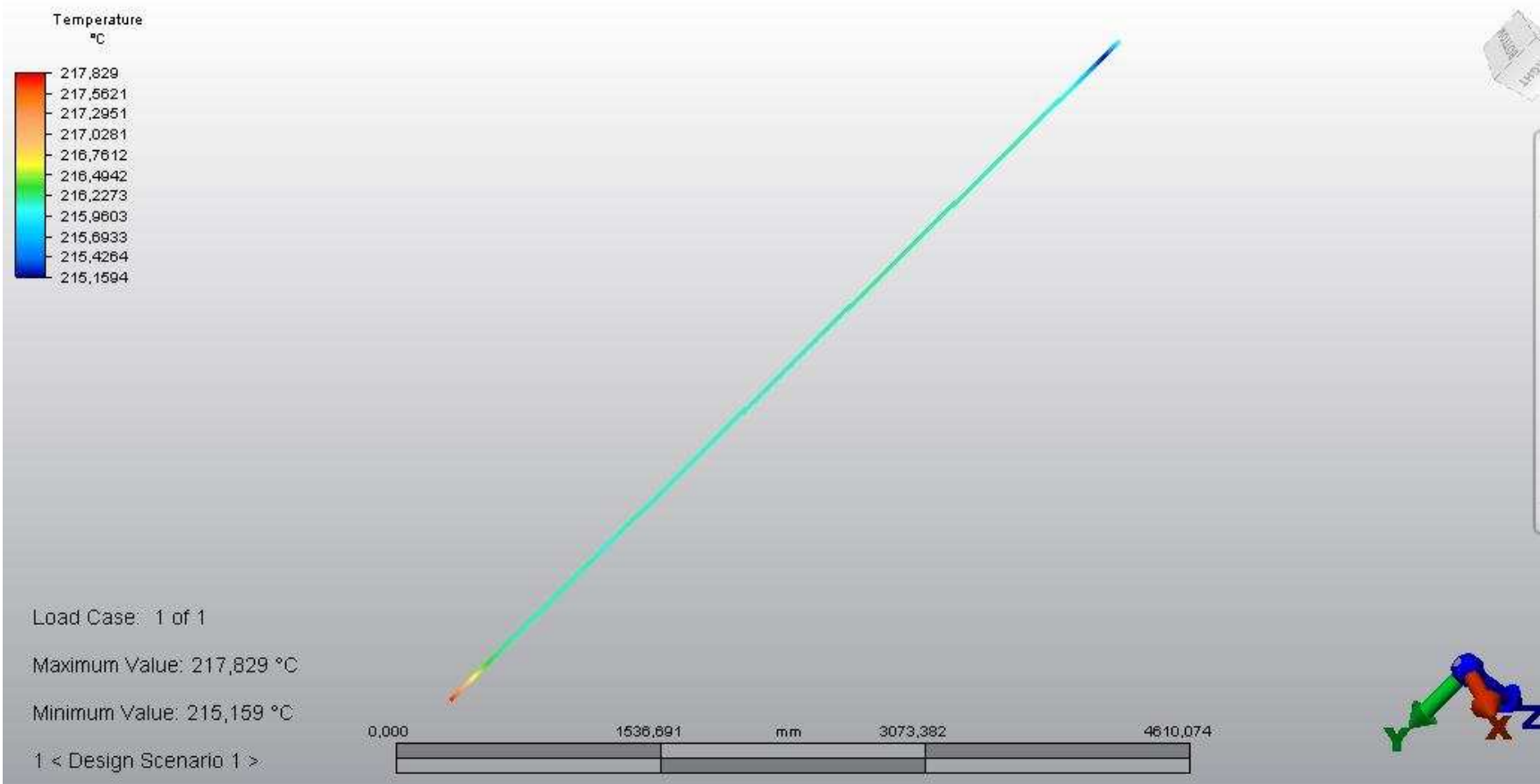


Figura 5. 14 Resultado Intercambiador de calor - Isometría

RESULTADO INTERCAMBIADOR DE CALOR

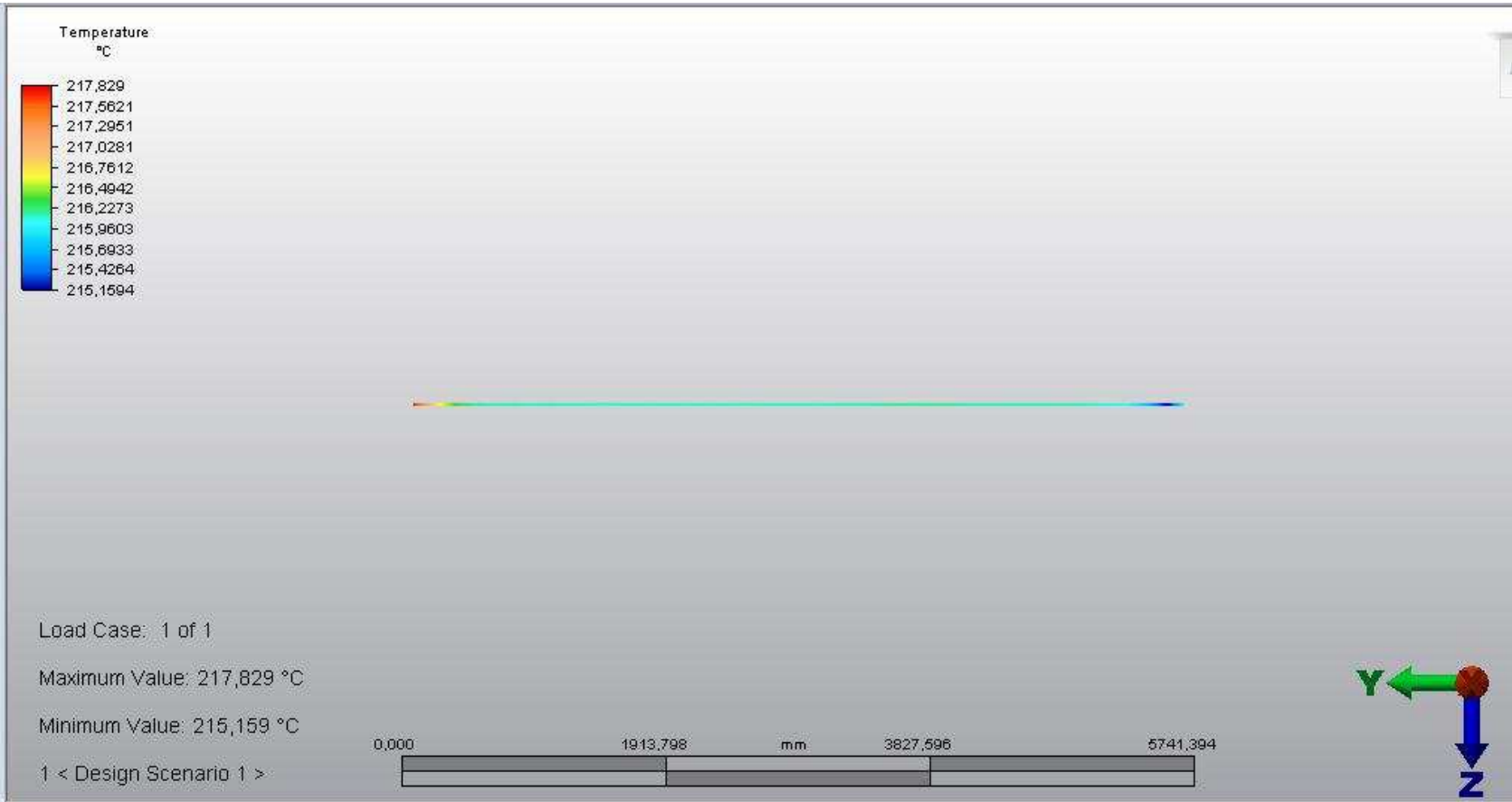


Figura 5. 15 Resultado Intercambiador de calor - Vista Lateral

5.4.6. SIMULACION DE LA PILA DE MADERA

Tabla 5.12. Datos ingresados de la pila de madera

Element type	Brick
Element definition	Brick térmico
Material	Plastic ABS Molded
Cad Mesh Options	Fine 50%
Surface Convection Loads (inside)	4.843E-006 W/mm ² °C
Inside temperature	75 °C

MALLADO PILA DE MADERA

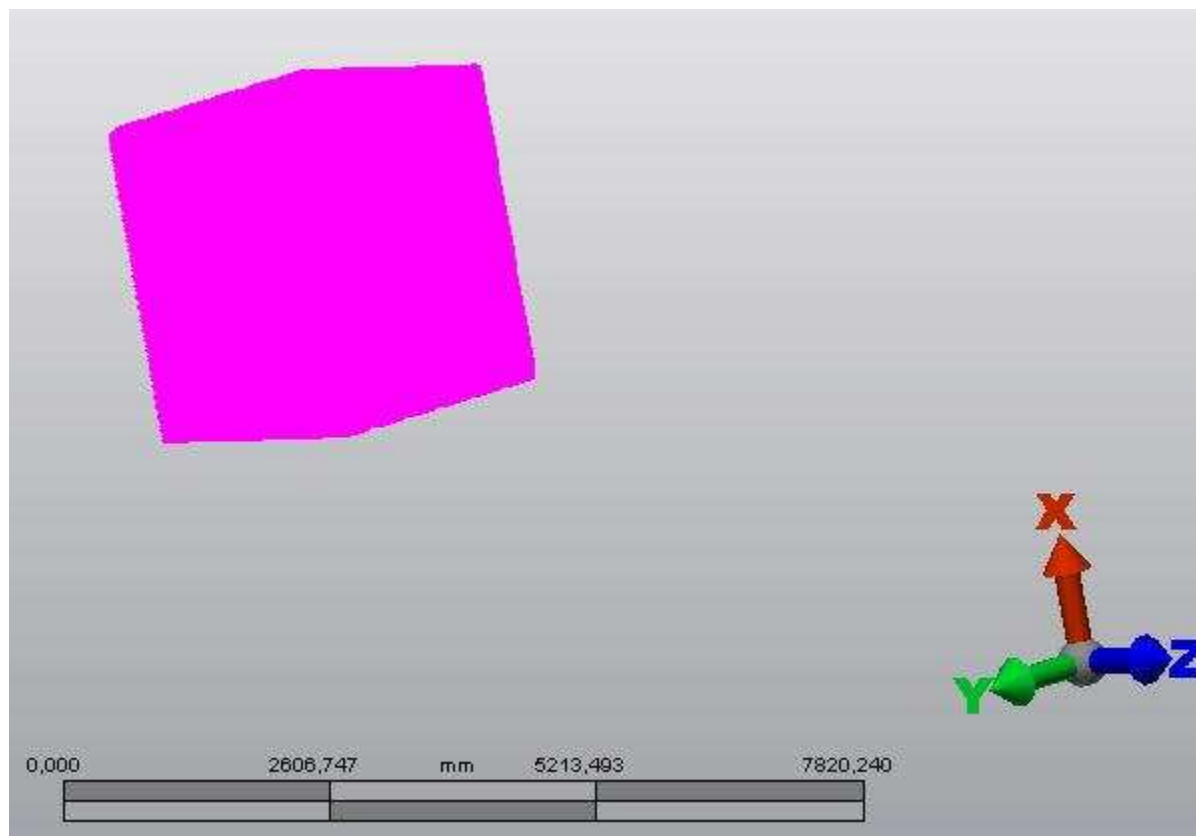


Figura 5. 16 Mallado pila de madera

RESULTADO PILA DE MADERA

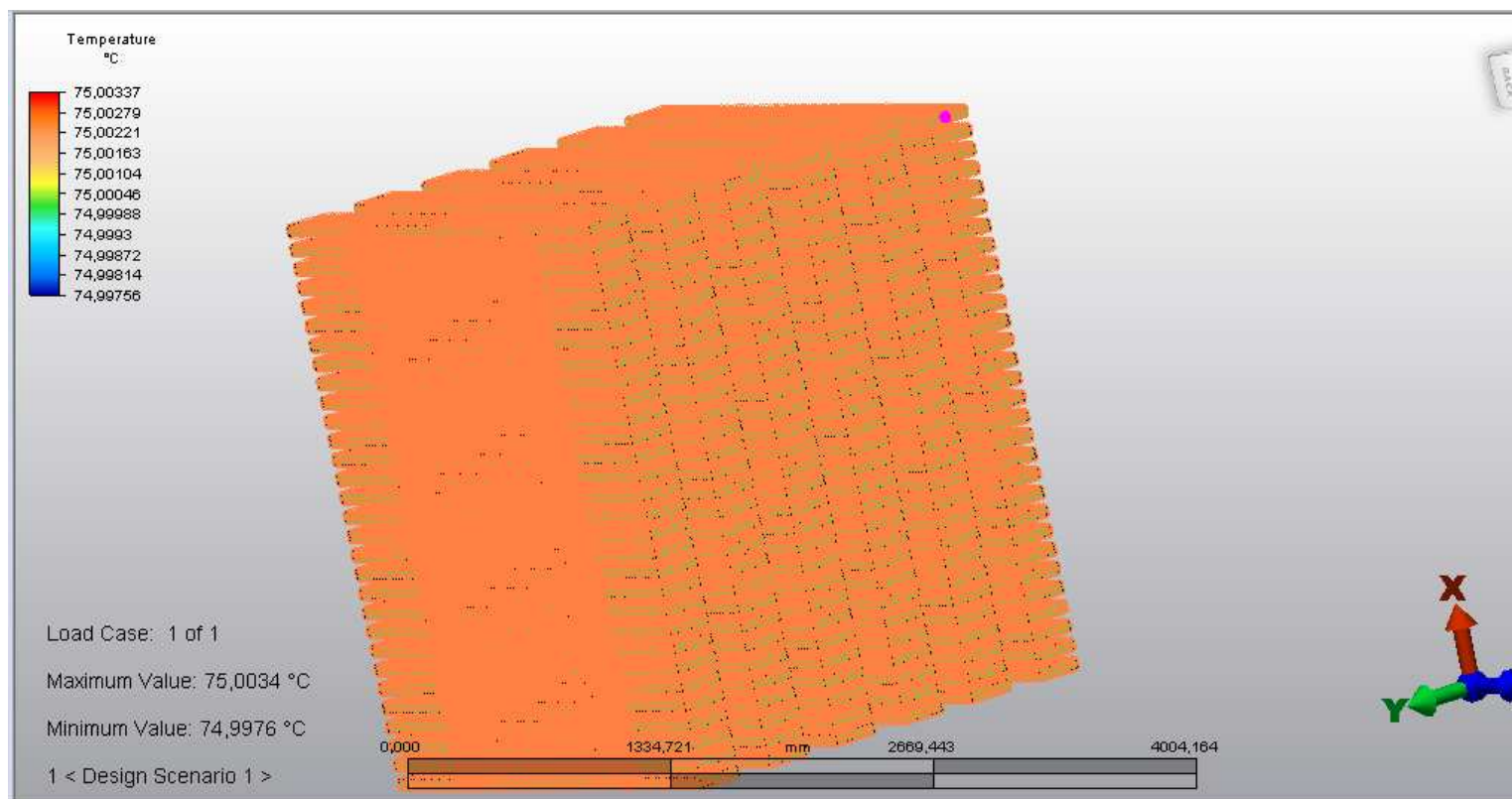


Figura 5. 17 Resultado Pila de madera - Isometría

RESULTADO PILA DE MADERA

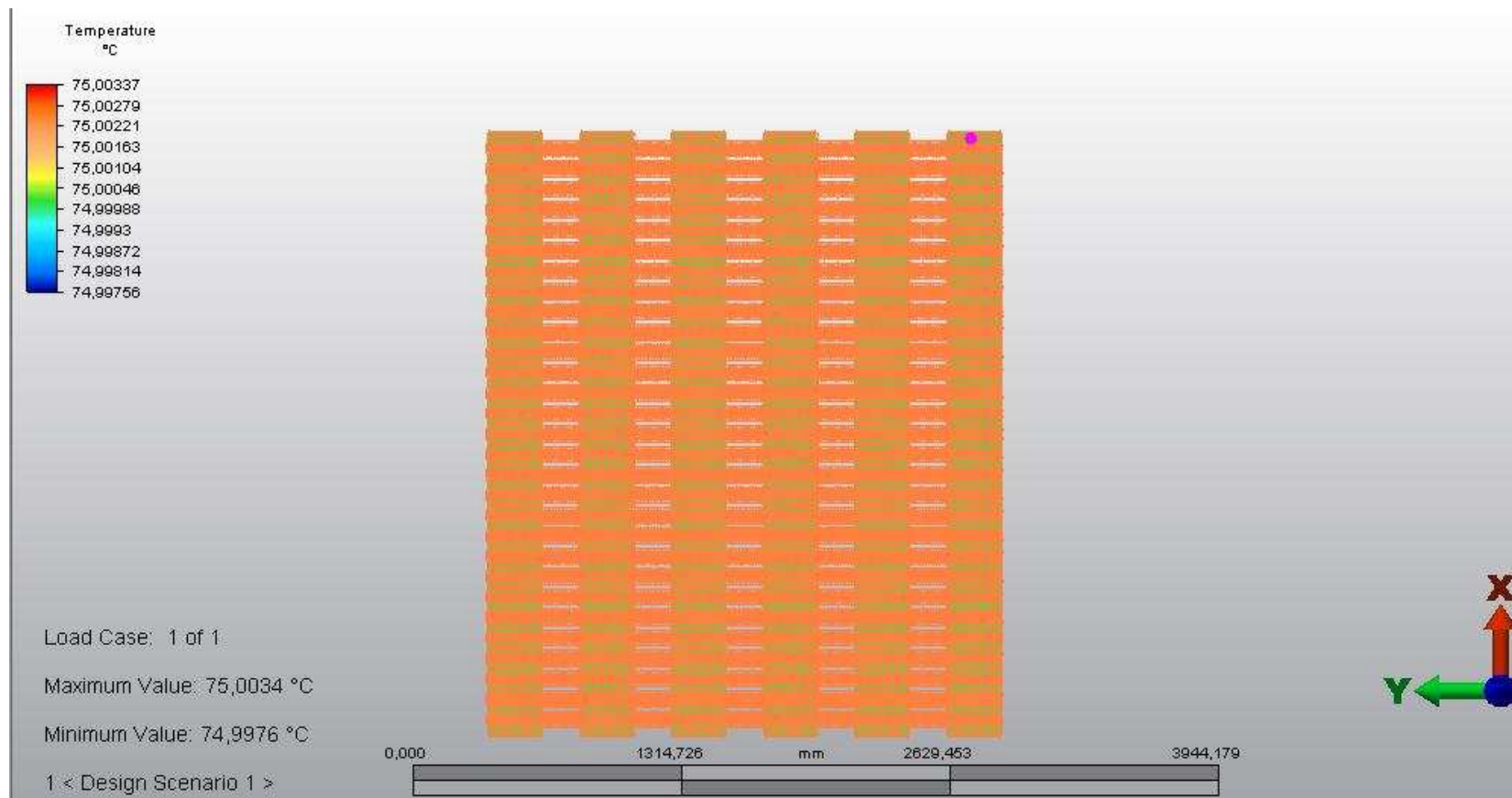


Figura 5. 18 Resultado Pila de madera - Vista Frontal

CAPITULO VI

ANALISIS ECONOMICO Y FINANCIERO

6.1. ANALISIS ECONOMICO.

El análisis económico del proyecto de un sistema de secado, comprende el costo de todos los valores o rubros de los materiales y máquinas que son necesarias para la implementación de todo el sistema de secado, es decir, la planta de secado completa, para una capacidad de 43 m³ /mes, aproximadamente de 980 tablones/mes.

Dichos costos se pueden obtener al hacer listas de los diferentes materiales, para proformar en varios proveedores, para de esta manera comparar cotizaciones, eligiendo la más adecuada sin esto significar que se adquirirá un producto de la mala calidad o funcionamiento.

Entonces, podemos subdividir en etapas de construcción o función, los componentes necesarios para el sistema secador de madera, para de esta manera poder llevar un registro ordenado de cuanto aproximadamente va a costar diseñar y construir el sistema.

MAQUINARIA Y EQUIPOS

1. Cámara de secado.
2. Sistema de calefacción.
3. Sistema de ventilación.
4. Sistema de humidificación.
5. Sistemas de control
- 6.-Camara de combustión
- 7.-Mano de obra y otros

6.1.1. CÁMARA DE SECADO.

Tabla 6.1 Cámara de secado.

LISTA DE MATERIALES	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL
Ladrillo solido(30cmx15cmx7cm)	u	1000	0,2	200
Alambre	lb	20	1	20
Columnas(25cm x 25cm)	u	9	80	720
Varilla 8 mm	q	1	100	100
Metros cuadrados de loza(15cm espesor)	m ²	30	40	1200
Metros cuadrados de piso(20cm espesor)	m ²	26	25	650
Fundas de cemento(50Kg)	kg	40	7	280
Arena	u	1	70	70
SUBTOTAL				3240

PUERTA				
Tol galvanizado(e=4 mm,2400X1200)	u	2	220	440
Lamina de vidrio(1,10cm x 300 cm)	u	15	10	150
L (e=1 cm 6000cm x 10 cm)	u	2	45	90
SUBTOTAL				680

TOTAL	3920
--------------	-------------

6.1.2. SISTEMA DE CALEFACCIÓN.

Tabla 6.2 Sistema de ventilación.

LISTA DE MATERIALES	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL
Tubos de acero(1``)	u	34	30	1020
Plancha de acero A36 e=16 mm, 2400x1200 (mm)	u	1	210,5	210,5
Espejos del intercambiador	u	2	50	100
Templadores	u	90	5	450
Chimenea 4000x200mm	u	1	30	30
Reductor ducto de salida	u	1	35	35
L (e=1 cm 6000cm x 10 cm)	u	1	45	45
TOTAL				1890,5

6.1.3. SISTEMA DE VENTILACIÓN.

Tabla 6.3 Sistema de ventilación.

LISTA DE MATERIALES	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL
Ventilador Axial 29000 CFM	2	240	480
Pernos hilti 1/2 plg	12	6	72
Bases y soportes	4	60	240
Tubo cuadrado 1 1/2" x6m	1	22	22
Caucho e=2mm (m)	12	1,5	18
Cable eléctrico m	12	0,8	9,6
	TOTAL		841,6

6.1.4. SISTEMA DE HUMIDIFICACIÓN.

Tabla 6.4 Sistema de humidificación.

LISTA DE MATERIALES	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL
Bomba 1 hp	1	150	150
Tubería de acero 1/2" x 6m	2	22	44
Ventilas 450x450 mm	4	40	160
Nebulizadores	6	15	90
Soportes	5	10	50
Tensores # 14	14	4,5	63
	TOTAL		557

6.1.5. CAMARA DE COMBUSTION.

Tabla 6.5 Cámara de combustión.

CAMARA DE COMBUSTION			
LISTA DE MATERIALES	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL
Ventilador radial Cap. 1230 CFM	1	200	200
Varilla 8 x 12000 mm	2	40	80
Cemento	3	7	21
Ladrillo solido(30cmx15cmx7cm)	150	0,2	30
Puerta de acero 500x350mm	1	80	80
Ducto de alimentación aserrín	1	40	40
	TOTAL		451

6.1.6. SISTEMA DE CONTROL

Tabla 6.6 Sistema de control.

SISTEMA DE CONTROL			
LISTA DE MATERIALES	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL
Tablero de control	1	120	120
Termohigrómetro	1	80	80
Termostato con sonda 120°C	1	37	37
Botonera	1	20	20
Interruptor 3 posiciones	1	8	8
Cable eléctrico m	12	0,8	9,6
Bornera	1	5	5
SUBTOTAL			279,6
TOTAL			279,6

6.1.7. MANO DE OBRA Y OTROS

Tabla 6.7 Mano de obra y otros.

	SEMANAS	PRECIO UNITARIO	TOTAL
CAMARA DE SECADO	4	140	560
SISTEMA DE CALEFACCION	4	100	400
SISTEMA DE VENTILACION	2	140	280
SISTEMA DE HUMIDIFICACION	1	120	120
SISTEMA DE CONTROL	1	150	150
CAMARA DE COMBUSTION	1	140	140
MONTAJES (2 PERSONAS)	2	100	200
TOTAL			1850

COSTOS DE CONSTRUCCION

Son aquellos costos necesarios para que la construcción de la planta se realice sin dificultad. Normalmente incluye: ingeniería de campo (inspección, ubicación de equipos, etc.); abastecimientos; equipos de construcción; servicios temporales.

Tabla 6.8 Costos de construcción.

	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL
CAMARA DE SECADO	1	3920	3920
SISTEMA DE CALEFACCION	1	1890,5	1890,5
SISTEMA DE VENTILACION	1	841,6	841,6
SISTEMA DE HUMIDIFICACION	1	557	557
SISTEMA DE CONTROL	1	279,6	279,6
CAMARA DE COMBUSTION	1	451	451
MANO DE OBRA	1	1850	1850
TOTAL			9789,7

COSTOS DE FUNCIONAMIENTO

Existe un período entre la finalización nominal de las obras y la producción en régimen normal, que se denomina "puesta en marcha" y cuya duración puede variar desde unas pocas semanas hasta varios meses.

Generalmente la puesta en funcionamiento del sistema de secado, es aproximadamente el 5 % del valor de la maquinaria.

Tabla 6.9 Gastos de funcionamiento.

	PRECIO UNITARIO	TOTAL
GASTOS DE PUESTA EN FUNCIONAMIENTO (5%)	489,485	489,49

IMPREVISTOS

Para este punto se recomienda tomar un 5 % de la suma de los valores de costos de construcción, y puesta en funcionamiento del sistema, como variaciones de pequeños precios adicionales.

Tabla 6.10 Imprevistos.

	PRECIO UNITARIO	TOTAL
COSTOS DE CONSTRUCCION (5%)	9789,7	489,49
GASTOS DE PUESTA EN MARCHA (50%)	489,485	244,74
TOTAL		734,23

INVERSIONES FIJAS

Las inversiones fijas se hayan conformadas por bienes que no se encuentran sujetos a transacciones, se obtienen durante la etapa de implementación o ejecución, y se utilizan durante el ciclo de vida del proyecto.

Tabla 6.11 Inversión Fija

CONSTRUCCION	9789,7
GASTOS DE PUESTA EN MARCHA	489,5
IMPREVISTOS	734,2
TOTAL	11013

CAPITAL DE OPERACIÓN**MANO DE OBRA DIRECTA**

Este elemento tiene como misión transformar la materia prima en una pieza, parte o producto final.

Constituye el valor del trabajo directo por los operarios, o, dicho en otros términos, el esfuerzo aportado al proceso fabril.

Tabla 6.12 Mano de obra directa.

DESIGNACION	CANT	COSTO UNITARIO	TOTAL MES	TOTAL ANUAL
OPERARIO	1	300	300	3600
TOTAL				3600

MANO DE OBRA INDIRECTA

Es aquella involucrada en la fabricación de un producto que no se considera mano de obra directa. La mano de obra indirecta se incluye como parte de los costos indirectos de fabricación.

Tabla 6.13 Mano de obra indirecta.

DESIGNACION	CANT	COSTO UNITARIO	TOTAL MES	TOTAL ANUAL
PERSONAL DE MANTENIMIENTO	1	100	100	1200
	TOTAL			1200

SUMINISTROS

Tabla 6.14 Suministros.

DESIGNACION	CANT	COSTO UNITARIO	TOTAL MES	TOTAL ANUAL
VIRUTA Y LENA Kg	5684	0	0	0
ENERGIA ELECTRICA Kw/h	4320	0,15	648	7776
AGUA m ³	150	0,35	52,5	630
REPARACIONES Y MANTENIMIENTO	2	50	100	1200
	TOTAL		801	9606

ESTADO DE PERDIDAS Y GANANCIAS

Este estado nos va a permitir conocer los gastos necesarios que debemos realizar para poder tener utilidades o ingresos.

DEPRECIACION

La depreciación se la considera a aquellos gastos que se van a tener a largo o corto plazo, la empresa, en cuestión de adquisición o cambios de aquellas partes que dentro de todo el sistema de secado, tienen una vida útil o de funcionamiento.

Tabla 6.15 Depreciación de equipos.

DEPRECIACION DE EQUIPOS		
DESIGNACION	CANT	TOT. A 10 AÑOS
CAMARA DE SECADO	1	392
SISTEMA DE CALEFACCION	1	189,05
SISTEMA DE VENTILACION	1	84,16
SISTEMA DE HUMIDIFICACION	1	55,7
SISTEMA DE CONTROL	1	27,96
CAMAR DE COMBUSTION	1	45,1
TOTAL		793,97

COSTOS DE PRODUCCION

Es aquel rubro necesario para llegar al producto deseado, es decir, por cada fase de secado, en este caso para poder obtener madera seca de la mejor calidad.

Tabla 6.16 Costos de producción.

DESIGNACION	CANT	COSTO UNITARIO	TOTAL MES	TOTAL ANUAL
MANO DE OBRA DIRECTA	1	300	300	3600
MANO DE OBRA INDIRECTA	1	100	100	1200
SUMINISTROS	1	801	801	9606
TOTAL			1201	14406

De los datos obtenidos en costos de producción de la tabla, podemos deducir que el costo por fase de secado es de 600,5 USD para 490 tablones obteniendo un costo de secado por tablón de madera de 1,22 USD.

6.1.8. GANANCIA NETA

Este parámetro nos van ayudar a visualizar de manera aproximada la utilidad en un intervalo de tiempo de un año, las utilidades que se puede obtener por concepto de secado de madera.

Tabla 6.17 Ganancias netas madera

DESIGNACION	CANT	COSTO UNITARIO	TOTAL MES	TOTAL ANNUAL
TABLONES DE MADERA SECADO	980	1,22	1195,6	14347,2
TABLON PROCESADO(MADERA SEMI-DURA)	980	0,50	490	5880
TOTAL			1685,6	20227,2

TABLON PROCESADO: es el proceso que comprende el tratamiento industrial a partir del tablón secado hasta que se encuentra listo a la venta.

RENTABILIDAD DEL PROYECTO PARA MADERAS SEMI-DURAS

6.1.9. FLUJO DE CAJA

Tabla 6.18 Flujo de Caja

FLUJO DE CAJA	
VENTAS	20227
GASTOS DE PRODUCCION	14406
MARGEN OPERATIVO BRUTO	5821
AMORTIZACION	793,97
BENEFICIO ANTES DEL IMPUESTO E INTERES	5027
INTERES	2010,9
BENEFICIO NETO	3016
AMORTIZACION	793,97
TOTAL	3810

6.2. ANALISIS FINANCIERO

6.2.1. ANALISIS DEL VALOR ACTUAL NETO.

Es un procedimiento que consiste en calcular el valor presente de un determinado flujo de caja futuro, el cual se origina por una inversión.

$$VAN = \sum_{t=0}^n \frac{BN_t}{(1+i)^t} - I_0$$

De donde:

BN: Beneficio neto del flujo del periodo t

Io : Inversión inicial

n : Número de años

i : Tasa de descuento

Si $VAN > 0$: El proyecto es rentable.

Si $VAN < 0$: El proyecto no es rentable.

La inflación tomada en cuenta produce un incremento del 10% anual y se realizó la proyección a 10 años.

Tabla 6.19 Valor actual neto.

Años(n)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Io	-11013										
BN		3810	4191	4610,1	5071,1	5578,2	6136	6749,6	7424,6	8167,1	8983,8
i	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%
(1+i)^n	1,00	1,20	1,44	1,73	2,07	2,49	2,99	3,58	4,30	5,16	6,19
Flujo descontado	-11013	3175	2910,4	2667,9	2445,6	2241,8	2054,9	1883,7	1726,7	1582,8	1450,9
VAN	11127										

Al ser el VAN mayor al valor de la inversión, el proyecto va a producir ganancias por encima de la rentabilidad exigida y es aceptable.

6.2.2. TASA INTERNA DE RETORNO

La tasa interna de retorno se refiere a la evolución del proyecto en función de una tasa única de rendimiento por periodo. En otras palabras es el cálculo del VAN igualado a cero.

$$VAN = \sum_{t=0}^n \frac{BN_t}{(1+i)^t} - I_0 = 0$$

La tasa calculada se compara con la tasa de descuento de la empresa, y esta al ser mayor deduce que el proyecto es rentable.

Tabla 6.20 Tasa interna de retorno

Años(n)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Io	-11013										
BN		3810	4191	4610,1	5071,1	5578,2	6136	6749,6	7424,6	8167,1	8983,8
TIR	42%										

La tasa interna de retorno es mucho mayor que la tasa de retorno asumida, por lo que el proyecto es rentable.

El tiempo de recuperación de la inversión es:

$$TR = \frac{\text{Costo total}}{\text{Utilidad neta}}$$

$$TR = \frac{11013}{1685.6} = 7 \text{ meses}$$

Entonces el tiempo de recuperación de la inversión es de 7 meses.

CAPITULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. CONCLUSIONES

- Mediante el diseño y la simulación se podrá obtener madera con el contenido de humedad necesaria, más uniformes, mejor calidad, en un tiempo relativamente corto, en comparación con el secado natural.
- Para el diseño del secado artificial de la madera se tomó en cuenta condiciones controladas de temperatura, humedad relativa y velocidad de circulación de aire.
- Con el diseño del secador de madera, determinamos las condiciones necesarias de operación, tanto para la cámara de secado como para la cámara de combustión así como también los equipos adecuados para su óptimo funcionamiento.
- Se concluye que la eficiencia del 17% la cual representa una eficiencia relativamente aceptable en comparación con otros secadores de madera que alcanzan el 15% al 20 %; eso se debe a que las pérdidas de calor en las paredes son muy altas.
- En base a la simulación mediante el programa Algor, ingresamos algunas variables como son las temperaturas internas y externas del secador, el material, coeficiente de convección calculado, con estos datos generamos un mallado con el cual realizamos la simulación.
- Concluimos que Algor es un programa útil para generar la simulación del secador con el identificamos una barra de temperaturas las zonas calientes y frías. Demos concluir que todo el software tiene sus limitantes y para el programa utilizado la limitante es el tiempo; no se lo puede ingresar en la simulación.

7.2. RECOMENDACIONES

- Dado que el proceso de secado de la madera juega un papel determinante en el desempeño, calidad y costo de cualquier artículo fabricado con madera, se hace necesario poner mayor atención al secado correcto de la madera y evaluar los métodos y técnicas existentes para poder aumentar el nivel tecnológico de nuestra industria maderera, y así lograr productos altamente competitivos.
- Es vital tener un control sobre el contenido de humedad de la madera, saber cómo determinarlo, comprender sus efectos y aprender cómo prevenir las dificultades generadas por los cambios de humedad.
- Implementar sistemas de control de calidad, desde patio hasta bodega de madera seca, que contemplen los indicadores mínimos para verificar la uniformidad y calidad del secado.
- Las industrias de la madera, en general, se abastecen de madera en estado húmedo. Si la industria no cuenta con adecuadas facilidades para secar la madera, como es el caso del secado artificial, esta madera pasará al proceso productivo sin ningún control en cuanto a su contenido de humedad, dando como resultado problemas durante su manufactura.
- Se recomienda utilizar materiales aislantes en las paredes o un ladrillo con mejores características en su porosidad principalmente; se recomienda colocar cauchos adecuados en la puerta y ventilas, para que eviten fugas de calor en el secador de esta forma la eficiencia del secador aumentaría considerablemente.

- Es importante enfatizar que Algor nos da un resultado gráfico el cual nos permite visualizar como está funcionando térmicamente cada elemento del secador, pero esto tiene limitaciones que ocasionan errores permisibles, y que no se pretende sustituir los métodos existentes de cálculos en la presente tesis. Algor se brinda como una herramienta que permita confirmar los cálculos obtenidos en este proyecto de tesis.

BIBLIOGRAFIA

- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.Inc.
- Appel, Josef. Proyecto Promadera. Editorial Cormadera.
- Ashrae Handbook Equipment. Second Printing.New York, Copyright.
- Bermúdez José y Cervantes Edwin. Diseño y Construcción de una Cámara de Combustión Utilizando Aserrín como combustible. Tesis, E.P.N. Quito. 1995
- Bonilla, Isaac. Montenegro, Fernando. Diseño de un secador de madera utilizando un intercambiador de calor de flujo cruzado. Tesis, ESPE. Quito.
- Holman J. P. Transferencia de calor.
- Incropera, Frank P. De Witt, David P. Incropera. Fundamentos de Transferencia de calor. Cuarta edición. Prentice Hall. Copyright.1996
- Karlekar. B.V. Transferencia de calor.
- Kern Donald. Procesos de Transferencia de Calor. Decimasexta Edición. México. Cia. Editorial Continental S.A
- Krivandin V. & Markov B. Metallurgical Furnaces. Primera Edición. Ed. Mir. 1980
- LOUGHBOROUGH. ABETO DE SITKA. Tabla de W. K.
- Manual del Grupo Andino para el secado de maderas, Junta del Acuerdo de Cartagena, Primera edición. Lima. Copyrigh. 1989

- Mills A.F. Transferencia de Calor.
- P. JOLY y F. M. CHEVALIER. 1980
- Predafort-Secap. Secado de la madera.
- R. Reid & T. Sherwood. Propiedades de los gases y los líquidos. Primera Edición. México. UTEHA. 1968.
- SECAP-GTZ. El secado de madera. Primera edición. Quito. OFFSET. SECAP.1991.
- WEAST, Handbook of Chemistry and Physics, 1981-82
- Yunus A. Cengel. Transferencia de Calor. Segunda Edición. Mc Graw Hill.

PAGINAS WEB:

- <http://www.evisaventiladores.com/evisaweb/ventiladores/pdf/CATALOGOS/AXIALES>
- <http://www.unalmed.edu.co/~lpforest/PDF/Guayac%E1n%20trebol.pdf>
- http://www.chapingo.mx/dicifo/posgrado/.../ruiz_hernandez_marcos_2006.pdf
- <http://www.unalmed.edu.co/~lpforest/PDF/Balsamo.pdf>
- http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-221X2005000200005&script=sci_arttext
- http://es.wikipedia.org/wiki/Zapata_%28cimentaci%C3%B3n%29

- <http://www.unalmed.edu.co/~geiq/psicrometrica.zip>
- <http://es.wikipedia.org/wiki/Aire>
- http://es.wikipedia.org/wiki/Presi%C3%B3n_parcial
- <http://www.monografias.com/trabajos12/origmem/origmem2.shtml>
- <http://www.uclm.es/profesorado/jvillasenor/esp/contatm/tema5-chimeneas.pdf>
- www.uo.edu.cu/ojs/index.php/tq/article/viewFile/2470/2000

ANEXOS

