



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE  
CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE MECÁNICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE SECADO  
DE MADERA PARA LA EMPRESA  
PARQUET “LOS PINOS”**

**ARIAS CAZCO PABLO JAVIER**

**TESIS DE GRADO**

Previa a la obtención del Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

**RIOBAMBA - ECUADOR**

**2010**

**EsPOCH**

Facultad de Mecánica

---

**CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE TESIS**

---

**CONSEJO DIRECTIVO**

**Octubre, 8 de 2010**

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

---

**PABLO JAVIER ARIAS CAZCO**

---

Titulada:

**“DISEÑO DE UN SISTEMA DE SECADO DE MADERA PARA LA EMPRESA  
PARQUET LOS PINOS”**

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

---

Ing. Geovanny Novillo A.  
DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

---

Ing. Rodolfo Santillán  
DIRECTOR DE TESIS

---

Ing. Ramiro Valenzuela  
ASESOR DE TESIS

---

## CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

---

**NOMBRE DEL ESTUDIANTE:** PABLO JAVIER ARIAS CAZCO

**TÍTULO DE LA TESIS:** “DISEÑO DE UN SISTEMA DE SECADO DE MADERA PARA LA EMPRESA PARQUET LOS PINOS”

**Fecha de Examinación:** Octubre, 8 de 2010.

**RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:**

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
ING. GEOVANNY NOVILLO (Presidente Trib. Defensa)			
ING. RODOLFO SANTILLÁN (Director de Tesis)			
ING. RAMIRO VALENZUELA (Asesor)			

\* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

**RECOMENDACIONES:** \_\_\_\_\_

---

El Presidente del Tribunal quien certifica al Consejo Directivo que las condiciones de la defensa se han cumplido.

---

f) Presidente del Tribunal

## **DERECHOS DE AUTORÍA**

El trabajo de grado que presentamos, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teórico - científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad del autor. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

---

f) Pablo Javier Arias Cazco

## **AGRADECIMIENTO**

El más sincero agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en especial a la Escuela de Ingeniería Mecánica, por brindarnos la oportunidad de obtener una profesión y ser personas útiles a la sociedad y en especial a Ing. Rodolfo Santillán e Ing. Ramiro Valenzuela, director y asesor respectivamente.

Para todos los amigos, compañeros y personas que me apoyaron de una u otra manera para culminar con éxito una etapa de mi vida.

**Pablo Arias Cazco.**

## **DEDICATORIA**

Dedico este estudio a Dios y a mis padres, Abdón y Martha ya que ellos son los principales impulsores para llegar a mi formación académica.

A mis hermanos Juan, Diego y Santiago, por ser lo más grande que tengo en mi vida.

**P.J.A.C.**

## TABLA DE CONTENIDOS

### CAPÍTULO

### PÁGINA

<b>1.</b>	<b>GENERALIDADES</b>	
1.2	Introducción.....	1
1.3	Planteamiento del problema.....	2
1.4	Objetivos.....	4
1.4.1	Objetivo general.....	4
1.4.2	Objetivos específicos.....	4
<b>2.</b>	<b>MARCO TEÓRICO DEL PROYECTO</b>	
2.1	Generalidades e importancia del uso de la madera.....	5
2.1.1	Generalidades.....	5
2.1.2	Importancia.....	6
2.2	Estructura de la madera.....	7
2.2.1	Diferencias entre coníferas y latifoliadas.....	10
2.3	Problemas de la madera en la preservación.....	11
2.3.1	Influencia de la humedad de la madera en la preservación.....	13
2.3.2	Punto de saturación de las fibras.....	14
2.3.3	Humedad higroscópica.....	14
2.3.4	Estructura anatómica.....	14
2.3.5	Propiedades físicas externas.....	15
2.4	Agentes que afectan la madera.....	16
2.4.1	Agentes biológicos.....	18
2.4.1.1	Hongos.....	18
2.4.1.1.1	Hongos xilófagos.....	20
2.4.1.1.2	Hongos cromógenos.....	24
2.4.1.1.3	Mohos.....	26
2.4.2	Agentes destructores de origen animal.....	28
2.4.2.1	Termes.....	30
2.4.2.2	Coleópteros.....	31
2.4.3	Agentes no biológicos.....	32
2.4.3.1	Fuego.....	32
2.4.3.2	Factores climáticos.....	32
2.4.3.3	Desgaste mecánico.....	33
2.5	Preservantes de la madera y su clasificación.....	34
2.5.1	Preservantes de la madera.....	34
2.5.2	Características de los preservantes.....	34
2.5.3	Clasificación de los preservantes.....	37
2.5.3.1	Preservantes oleosos (productos orgánicos).....	39
2.5.3.2	Preservantes hidrosolubles.....	40
2.5.3.3	Preservantes erradicantes.....	41
2.6	Preparación de la madera para el tratamiento.....	43
2.6.1	Descortezado.....	43

2.6.2	Secado.....	43
2.7	Propiedades de la madera preservada.....	44
2.7.1	Buen encolado.....	44
2.7.2	Inflamabilidad.....	44
2.7.3	Resistencia.....	44

### 3. SECADO DE LA MADERA

3.1	Teoría del secado.....	46
3.1.1	Conceptos básicos.....	46
3.1.2	Ventajas del secado de madera.....	48
3.2	Métodos actuales para el secado.....	48
3.2.1	Secado natural.....	49
3.2.1.1	Precauciones y procedimientos previstos.....	50
3.2.1.2	Ventajas y desventajas del secado al aire libre.....	51
3.2.1.3	El tiempo de secado en forma natural.....	52
3.2.1.4	Características del terreno.....	53
3.2.1.5	Apilado de madera y sus elementos.....	54
3.2.1.6	Tipos de apilado de la madera.....	55
3.2.1.7	Duración del secado al aire.....	57
3.2.2	Secado artificial.....	58
3.2.2.1	Parámetros que influencias los tiempos de secado.....	59
3.2.2.2	Equipo de secado.....	60
3.2.2.3	Preparación de las cámaras de secado.....	61
3.2.2.4	Carga de la cámara de secado.....	62
3.2.2.5	Defectos de secado.....	65
3.2.2.5.1	Colapso.....	66
3.2.2.5.2	Tensiones internas en el transcurso del secado.....	67
3.2.2.5.3	Rajaduras deformaciones y daños debidos a un secado mal conducido.....	67
3.2.2.5.4	Variación de coloración.....	69
3.3	Tipos de secadores.....	73
3.3.1	Sistema de condensación.....	73
3.3.2	Sistema de convección.....	74
3.3.2.1	Principio de funcionamiento.....	76
3.3.3	Secaderos de energía solar.....	77
3.3.3.1	Principio de funcionamiento.....	78
3.3.4	Secadero al vacío.....	78
3.3.4.1	Principio de funcionamiento.....	80
3.3.5	Secadero por radiofrecuencia.....	81
3.4	Parámetros del secado.....	82
3.4.1	Bases tecnológicas para el secado.....	82
3.4.1.1	La humedad de la madera.....	82
3.4.1.2	Evolución del contenido de humedad en el secado de madera.....	84
3.4.1.3	Peso de la madera.....	85
3.4.1.3.1	Peso específico aparente.....	85
3.4.1.3.2	Peso específico húmedo de la madera.....	86

3.4.2	Bases físicas para el secado de la madera.....	87
3.4.2.1	Temperatura.....	87
3.4.2.2	Presión del vapor saturado.....	88
3.4.2.3	Presión parcial.....	89
3.4.2.4	Humedad relativa.....	89
3.4.2.4.1	Psicrómetro.....	90
3.4.2.4.2	Higrómetro.....	91
3.4.2.4.3	Carta psicométrica.....	92
3.4.2.5	Velocidad del aire.....	93
3.4.2.6	El equilibrio higroscópico.....	94
3.5	Necesidad de un secador de madera.....	95
3.6	Alternativas de un secador de madera.....	96
3.7	Selección de la alternativa.....	97

#### 4. **DISEÑO DEL SISTEMA**

4.1	Determinación de parámetros de diseño del sistema.....	98
4.1.1	Parámetros físicos.....	98
4.1.1.1	Dimensionamiento de la cámara de secado.....	98
4.1.2	Parámetros térmicos.....	102
4.2	Cálculos térmicos.....	105
4.2.1	Determinación del espesor del aislante.....	108
4.2.2	Determinación de las resistencia térmicas y pérdidas.....	109
4.2.3	Sistema de ventilación.....	120
4.2.3.1	Caudal de aire requerido.....	120
4.2.3.2	Caída de presión.....	121
4.2.4	Sistema de calefacción.....	123
4.2.4.1	Etapa de calentamiento.....	123
4.2.4.2	Etapa de secado.....	130
4.2.4.3	Diseño del intercambiador de calor.....	134
4.2.4.4	Intercambiador de calor de tubos con aleta circular.....	151
4.2.5	Diseño térmico del caldero.....	154
4.2.5.1	Consumo de combustible.....	157
4.2.5.2	Consumo de biomasa.....	157
4.2.5.3	Calculo de flujo de aire necesario.....	159
4.2.5.4	Diseño del horno y elementos del caldero.....	164
4.2.5.5	Diseño del intercambiador de calor.....	172
4.2.6	Diseño mecánico estructura metálica.....	182
4.3	Selección de equipos.....	187
4.4	Diagrama de control.....	193

#### 5. **ESTUDIO DE COSTOS**

5.1	Costos directos.....	194
5.2	Costos indirectos.....	197
5.3	Costo total aproximado del proyecto.....	198

5.4	Análisis de costos de secado por metro cúbico de madera.....	199
5.4.1	Depreciación sobre la inversión del secadero.....	199
5.4.2	Interés sobre la inversión.....	200
5.4.3	Interés sobre el costo del terreno ocupado por el secadero.....	200
5.4.4	Costo de la energía consumida por los ventiladores.....	200
5.4.5	Costo de la mano de obra durante el apilado.....	201
5.4.6	Costo de la mano de obra durante la descarga.....	201
5.4.7	Valor de las pérdidas de madera durante el secado.....	202
5.4.8	Costo total de secado en horno.....	202

## 6. **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

6.1	Conclusiones.....	203
6.2	Recomendaciones.....	205

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BIBLIOGRAFÍA

LINKOGRAFÍA

ANEXOS

PLANOS

## LISTA DE TABLAS

<u>TABLA</u>		<u>PÁGINA</u>
3.1	Espesor de los separadores.....	64
3.2	Reducción de los defectos de secado.....	71
3.3	Calidad en el secado.....	72
3.4	Contenido de humedad de la madera.....	83
3.5	Peso específico de la madera húmeda.....	85
3.6	Relación de humedades.....	94
4.1	Dimensiones de los tablones a secar.....	98
4.2	Espesor de los elementos de las paredes y techo.....	107
4.3	Valores calculados de la resistencia R3.....	114
4.4	Valores calculados de la resistencia R1.....	117
4.5	Valores calculados de la resistencia R5.....	119
4.6	Consumo de energía térmica.....	131
4.7	Poder calorífico de la leña.....	158
4.8	Composición química del diesel 2.....	159
4.9	Moles de aire requerido.....	160
4.10	Dimensiones del hogar.....	168
4.11	Longitud media de la trayectoria radiante.....	169
4.12	Presiones críticas de sustancias.....	178
4.13	Perfiles seleccionados para la estructura.....	183
5.1	Elementos de la estructura y paneles.....	191
5.2	Equipos y accesorios.....	192
5.3	Máquinas y herramientas.....	193
5.4	Materiales consumibles.....	193
5.5	Mano de obra directa .....	193
5.6	Resumen de costos directos.....	194
5.7	Insumos .....	194
5.8	Otros.....	195
5.9	Resumen de costos indirectos.....	195
5.10	Costo total del proyecto.....	196

## LISTA DE FIGURAS

<u>FIGURA</u>		<u>PÁGINA</u>
2.1	Partes del tronco.....	7
2.2	Árbol de forma latifoliada.....	10
2.3	Árbol de forma conífera.....	11
2.4	Clasificación de los agentes que afectan a la madera.....	17
2.5	Hongos xilófagos.....	20
2.6	Pudrición blanca.....	21
2.7	Hongos cromógenos.....	24
2.8	Apilado de la madera.....	26
2.9	Insectos destructores de la madera.....	28
2.10	Insectos xilófagos.....	28
2.11	Termita y sus efectos.....	30
2.12	Clasificación de los preservantes.....	38
3.1	Apilado de la madera y sus elementos.....	54
3.2	Apilado vertical.....	55
3.3	Apilado horizontal.....	56
3.4	Apilado en caballete.....	56
3.5	Apilado en triángulo.....	57
3.6	Cámara de secado.....	61
3.7	Apilado en la cámara de secado.....	62
3.8	Contracción de la madera.....	63
3.9	Apilado incorrecto.....	63
3.10	Tipos de deformaciones según la zona.....	68
3.11	Sistema de condensación.....	73
3.12	Sistema de convección.....	75
3.13	Secadero de energía solar.....	77
3.14	Secadero de vacío.....	80
3.15	Secadero por radiofrecuencia.....	81
3.16	Parámetros para selección de probetas.....	84
3.17	Psicómetro.....	91
3.18	Higrómetro.....	91
3.19	Carta psicométrica.....	92
4.1	Dimensiones de la pila de madera.....	99
4.2	Conjunto de pilas en el interior de la cámara de secado.....	100
4.3	Separación entre las pilas de madera.....	100
4.4	Cámaras de secado.....	101
4.5	Pared compuesta y análogo eléctrico.....	108
4.6	Pérdidas en función del espesor del aislante.....	109
4.7	Determinación de las entalpías.....	129
4.8	Balance energético.....	135
4.9	Corte transversal de un intercambiador de calor.....	137
4.10	Diagrama de resistencia en el tubo.....	148

4.11	Aletas del intercambiador de calor.....	151
4.12	Curva de ebullición del agua.....	177
4.13	Porcentaje de influencia de las resistencias.....	181
4.14	Estructura metálica.....	184
4.15	Controlador programable.....	185
4.16	Controlador de temperatura.....	185
4.17	Válvula solenoide para aire.....	186
4.18	Válvula solenoide para vapor.....	186
4.19	Válvula operacional.....	187
4.20	Pistón de simple efecto.....	187
4.21	Temporizador.....	188
4.22	Ventiladores blindados.....	189
4.23	Diagrama de control del secadero.....	190

## SIMBOLOGÍA

Ho	Contenido de humedad inicial.
Hf	Contenido de humedad final.
CH	Contenido de humedad de la madera.
PS	Peso seco de la madera.
PH	Peso húmedo de la madera.
$\gamma_h$	Peso específico de la madera.
$\gamma_o$	Peso específico de la madera anhidra.
H	Humedad anhidra de la madera.
P	Presión atmosférica.
Pv	Presión parcial de vapor.
Pa	Presión parcial del aire seco.
$\phi$	Humedad relativa.
Pv	Presión real de vapor.
Pg	Presión de saturación del vapor.
$R_T$	Resistencia térmica total.
$R_{1,2,3,4,5}$	Resistencias a través de una pared plana compuesta.
$T_i$	Temperatura en el interior de la cámara.
$T_a$	Temperatura ambiente.
$T_{pi}$	Temperatura de la pared interior.
$T_{pe}$	Temperatura de la pared exterior.
Re	Número de Reynolds.
v	Velocidad del fluido.
Lc	Longitud característica.
$\nu$	Viscosidad cinemática a la temperatura interior.
Tf	Temperatura fílmica.
$T_i$	Temperatura inicial del fluido .
$T_{pi}$	Temperatura final del fluido en la pared interior.
Nu	Número de Nusselt.
Pr	Número de Prandtl
h	Coefficiente de transferencia de calor.
A	Área de las paredes.
e	espesor de la pared galvanizada.
k	Conductividad térmica.
Q	Calor.
V	Caudal de aire.
A	Área libre
v	Velocidad de aire
s	Espesor de los separadores.
L	Longitud de la madera.
a	Altura de la pila.
x	Área libre lateral de la pila.
$\rho_a$	Peso específico del aire.
p	Presión del aire en Riobamba.
T	Temperatura.
$\Delta p$	Resistencia de las pilas de madera.

F	Profundidad de las pilas del recorrido de aire.
$\lambda$	Factor de aspereza.
g	Aceleración de la gravedad.
$m_h$	Masa de madera húmeda
$\rho_h$	Densidad de la madera húmeda.
$m_{\text{agua}}$	Masa de agua.
$CH_{\text{verde}}$	Contenido de humedad de la madera en estado verde.
H	Porcentaje de humedad.
$C_p$	Calor específico.
$\Delta T$	Incremento de temperatura
$m_h$	Masa de madera húmeda
$m_{\text{agua}}$	Masa de agua.
$m_m$	Masa de madera
$h_1$	Entalpía inicial de aire húmedo.
$h_2$	Entalpía final de aire húmedo.
$V_{\text{aire}}$	Volumen de aire.
$V_{\text{secadero}}$	Volumen del secadero.
P	Presión atmosférica.
T	Temperatura promedio de calentamiento.
$m_{\text{aire}}$	Masa de aire
$C.H_i$	Contenido de humedad inicial.
$C.H_{\text{psf}}$	Contenido de humedad en el P.S.F.
$M_{\text{agua libre}}$	Masa de agua libre.
$\varepsilon_{L1}$	Energía térmica requerida para el secado.
$CH_f$	Contenido de humedad final.
$T_{ei}$	Temperatura de entrada al intercambiador.
$\mu_a$	Viscosidad dinámica.
$T_f$	Temperatura fílmica.
$A_f$	Área frontal al ingreso del intercambiador.
$V_a$	Velocidad del aire a la entrada del intercambiador.
$\rho_a$	Densidad del aire en Riobamba.
$De$	Diámetro exterior de la tubería.
$\mu$	Viscosidad dinámica.
$A_{cd}$	Área del colector y distribuidor.
$\dot{m}$	Gasto másico del fluido.
$N_T$	Número de tubos en el plano transversal al fluido.
g	Aceleración gravitacional.
U	Coefficiente global de transferencia de calor.
$R_{f,o}$	Factor de incrustación en la superficie externa del tubo.
$R_{f,i}$	Factor de incrustación en la superficie interna del tubo.
$R_w$	Resistencia de pared respecto a la superficie externa del tubo.
$h_a, h_v$	Coefficientes de convección externo e interno.
$A_S$	Área superficial de transferencia de calor.
$e_t$	Espesor del tubo.
$L_A$	Longitud de la aleta.
$N'$	Número de aletas por cada tubo.
$h_{fg}$	Entalpía de vaporización
$M_{ah}$	Moles de aire húmedo.

$M_{as}$	Moles de aire seco.
$W_{ah}$	Aire húmedo para quemar una libra de combustible.
$W_{as}$	Aire seco para quemar una libra de combustible.
$Ea$	Exceso de aire para la combustión.
$Pc$	Peso de combustible.
$Ova$	Oxígeno en volumen de aire.
$M$	Fracción húmeda presente.
$Pw$	Presión del vapor de agua presente en el aire de Riobamba
$Mgc$	Masa de gases producidos por el combustible.
$F$	Factor de intercambio.
$Tg$	Temperatura de los gases producto de la combustión
$Q_F$	Calor liberado en la combustión.
$m_F$	Cantidad de combustible requerido.
$m_{Ar}$	flujo de aire requerido.
$S_t$	Superficie externa del tubo
$L$	Longitud de los tubos
$De$	Diámetro externo de los tubos
$N_t$	Número de tubos.
$F_{pg}$	Flujo promedio de gases.
$Acp$	Área de plano frío (tubos).
$\alpha$	Factor de Efectividad.
$Dcc$	Distancia de centro a centro de cada tubo.
$A_T$	Área de transferencia de calor.
$A_R$	Área radiante.
$Lr$	Longitud de la trayectoria media (radiación).
$a't$	Área de transferencia.
$at$	Área de transferencia total.
$n$	Número de pasos.
$Trec$	Temperatura recomendada para obtener una alta eficiencia.
$Ks$	Constante propuesto por Borishanski.
$P_c$	Presión crítica de cada sustancia en este caso agua.
$P_r$	Presión reducida

## ABREVIATURAS

P.S.F.	Punto de saturación de las fibras
A.S.T.M	Sociedad Americana para Pruebas y Materiales
C.F.M	Pie cúbico por minuto
L.M.T.D	Diferencia de temperatura media logarítmica
S.A.E	Sociedad de Ingenieros Automotrices.
CC	Corriente continua.

## LISTA DE ANEXOS

- Anexo 1 Propiedades de los materiales metálicos
- Anexo 2 Propiedades de los materiales no metálicos
- Anexo 3 Propiedades físicas del aire
- Anexo 4 Conductividad térmica del aire
- Anexo 5 Viscosidad dinámica del aire
- Anexo 6 Separación entre tubos y coeficientes de correlación
- Anexo 7 Dimensiones de tubería de cobre
- Anexo 8 Factor de corrección para el número de Nusselt
- Anexo 9 Factor de incrustación en el exterior e interior de los tubos
- Anexo 10 Conductividad térmica del cobre
- Anexo 11 Conductividad térmica del aluminio
- Anexo 12 Eficiencia de las aletas
- Anexo 13 Temperatura de salida de los gases de combustión
- Anexo 14 Dimensiones de tubería de acero ASTM A192
- Anexo 15 Radiación debida al bióxido de carbono
- Anexo 16 Radiación debida al vapor de agua
- Anexo 17 Factor de intercambio F
- Anexo 18 Propiedades físicas de los gases con hollín
- Anexo 19 Valor de ecuación de flujo de gases
- Anexo 20 Propiedades de los perfiles de aluminio
- Anexo 21 Catálogo de ventiladores

## RESUMEN

Se ha diseñado un sistema de secado de madera, con la finalidad de satisfacer una necesidad en la empresa Parquet "Los Pinos", ubicada en la ciudad de Riobamba. El propósito de esta investigación es satisfacer una necesidad, acelerar el proceso de secado con costos bajos y obteniendo altos estándares de calidad, es decir evitar deformaciones en la madera durante el proceso.

El secador de madera está compuesto por tres partes fundamentales: estructura metálica del secadero, sistema de calefacción-ventilación y caldero de sistema compuesto. Su funcionamiento será continuo durante el secado para lograr el control de las variables humedad, temperatura y velocidad del aire, estos parámetros son medidos por equipos electrónicos modernos compuestos principalmente por microcontroladores.

A través de la creación de este sistema industrial, la fábrica podrá aprovechar de una mejor manera los desperdicios producidos en el proceso de fabricación de pisos de madera y a la vez utilizarlo como combustible para la obtención de vapor. La conservación del medio ambiente es motivo de preocupación y como futura persona productiva concientizar en el aprovechamiento energético dejando la dependencia de los combustibles derivados del petróleo. Al culminar el presente estudio se determinó la mejor alternativa es el secador convectivo. El presente documento también contiene una investigación completa de agentes destructores en la industria maderera y métodos para combatirlos.

## SUMMARY

A Wood drying system has been designed at “Los Pinos” Parquet Enterprise, located in the city of Riobamba. The purpose of this investigation was to cope with an enterprise’s need, that of pursuing a low cost drying accelerating process for obtaining high quality standards for preventing damage from wood deformation.

The wood dryer is a system composed of three main parts: a dryer metallic structure, an air conditioning-heating system and a compound fuel metal pot. The machine will work on a continual day and night basis, while the process of the drying activity is still on.

In order to reach the control on certain variables, for example, moisture, temperature, and air velocity, the parameters are gauged by means of microcontrollers which are updated electronic equipment.

Through out the setting of this industrial system, the wood factory will be able to improve its wood floor production in a more reliable way. Thus, the system will be capable of using wood waste and debris constituting the fuel for the dryer, which in turn will produce steam.

Environmental conservancy has always been the writer’s main concern which goes along with the prospective professional intention of becoming a productive person for making people become conscientious about energetic progress and preventing them from becoming dependant on oil by-products.

At the end of this research, it was concluded that the variety of dryers was great; however, a convective one showed to be the most appropriate. This paper also contains a complete investigation on wood industry destructive agents and methods to combat them.

## **CAPÍTULO I**

### **1. GENERALIDADES**

#### **1.1 Introducción**

El avance experimentado por la industria de fabricación de secaderos, permite disponer de técnicas y tecnologías que han optimizado el rendimiento energético y la capacidad de las cámaras de secado. La industria maderera es una de las áreas menos desarrolladas en el país, la falta de transferencia tecnológica implica la dependencia hacia otros países, lo que involucra costos muy elevados en el producto final.

En el mercado nacional e internacional es cada vez mayor el requerimiento de productos elaborados con madera con un bajo contenido de humedad, razón suficiente para optimizar los programas de secado que son actualmente utilizados y al mismo tiempo, crear nuevos para especies que no disponen de éstos. El valor agregado que se otorga a la madera mediante procesos, tales como el secado, es, sin lugar a duda importante para la valorización del producto.

Los productos procesados adquieren una mejor cotización en el mercado, convirtiendo así al manejo sostenible en una alternativa más atractiva desde el punto de vista económico.

## **1.2 Planteamiento del problema**

Uno de los procesos más exigentes en la preparación de la madera para usos industriales y domésticos es el secado. De hecho, de su correcto desarrollo depende que este material ofrezca buenos resultados durante y después del proceso de transformación. El secamiento es el proceso de eliminar el exceso de agua de la madera para facilitar su posterior procesamiento y regularidad. Pero el concepto de secado va más allá de una simple definición, abarca el conocimiento de la materia prima, de su comportamiento y de los equipos utilizados para adelantar un procesamiento óptimo. Las consideraciones físicas y mecánicas de la materia prima así como las técnicas que se refieren al tipo y manejo de los equipos escogidos para esta práctica son aspectos fundamentales cuando se planea adelantar un secado.

La madera en su estado natural ofrece limitaciones que se refieren principalmente a la susceptibilidad de ser atacada por organismos vivos que la pueden destruir. Se debe tener muy en cuenta que la madera no es un material de construcción, fabricado a propósito por el hombre, sino que es un material obtenido del tronco y las ramas de los árboles y por tanto es propenso a sufrir de enfermedades así como el complementar el conocimiento del comportamiento de la madera en sus procesos de transformación, mediante la comprensión de los conceptos básicos, teóricos y prácticos sobre los aspectos del fenómeno del secado de la madera aserrada, así como el conocimiento y dominio de las diferentes técnicas existentes para lograr el secado de la madera.

### **1.3 Justificación**

Para la elaboración de esta tesis se requiere conocimientos técnicos como los adquiridos por las diferentes cátedras que se dictan en la Facultad de Mecánica, entre las que se resaltan las áreas de Térmicas, Diseño, Materiales, de esta manera queda justificado el aspecto académico requerido. Al referirnos a lo social se debe tomar en cuenta que con este proyecto se generará fuentes de empleo, activando así el aparato productivo de la ciudad ya sea a mayor o menor escala.

Se tendrá en cuenta la optimización del uso de la energía requerida para el proceso de secado de la madera, toda vez que se pretende optimizar costos de producción, así como evitar la contaminación ambiental mediante el arrojo de desperdicios de biomásas y gases de combustión. Puesto que en la actualidad lo que más nos preocupa es la conservación del medio ambiente se realizará estudios que guíen el manejo de una tecnología limpia en la combustión necesaria para el proceso de secado. La tendencia en el sector maderero es el de crecimiento es así que se busca innovar obteniendo mayor eficiencia en el secado de madera y lo más importante dejar la dependencia de tecnologías extranjeras. De tal manera que se plantea el diseño de un sistema de secado de madera para la empresa Parquet “Los Pinos”.

Finalmente se pretende con el diseño del sistema de secado, optimizar costos de producción de la materia prima tratada, esto es la obtención de un producto final de calidad y costos convenientes.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo General:**

- Diseñar un sistema de secado de madera para la empresa “Parquet Los Pinos.”

### **1.4.2. Objetivos Específicos:**

- Estudiar la teoría del secado de madera
- Analizar y seleccionar la alternativa de secador adecuado.
- Diseñar el caldero para biomasas o desechos sólidos y combustibles convencionales (diesel o gas).
- Estudiar en el ámbito térmico y mecánico el sistema de secado.
- Seleccionar elementos auxiliares y complementarios del sistema
- Proponer la implementación de tecnologías actuales para la industria maderera del país, generando fuentes de empleo.
- Minimizar los costos con una mejor eficiencia económica-energética.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO DEL PROYECTO

#### 2.1 Generalidades e importancia del uso de la madera [1]

##### 2.1.1 Generalidades

El racional aprovechamiento del recurso maderero es imprescindible para el bienestar del hombre y es precisamente este objetivo que lo ha llevado a buscar y promocionar el uso de una diversidad de especies para: muebles, tableros aglomerados, contrachapados, pulpa para papel, construcción y otros.

El actual agotamiento de los bosques naturales, por lo tanto de especies madereras muy importantes, especialmente de densidades medias-altas o llamadas comerciales, hace meditar en su reemplazo por especies de inferiores características; es cuando se recurre a las técnicas apropiadas de preservación con el objetivo de tener una madera de similares (igual o mejor) servicios hacia su utilización óptima.

En el transcurso del tiempo y por objetos encontrados en diferentes sitios de Europa y Asia (Egipto, China, etc.), que actualmente algunos reposan en museos, se ha podido comprobar que el hombre usó preservantes en sus diferentes objetos de madera (sarcófagos, baúles, embarcaciones), así por ejemplo: los chinos sumergían la madera en agua salada antes de usar en edificaciones, los egipcios emplearon aceites de cedro, ciprés, oliva; en América el uso de resinas y cauchos.

El apareamiento de nuevos procedimientos y productos fueron desarrollados por destacados investigadores como: Batchell, Lowry y otros.

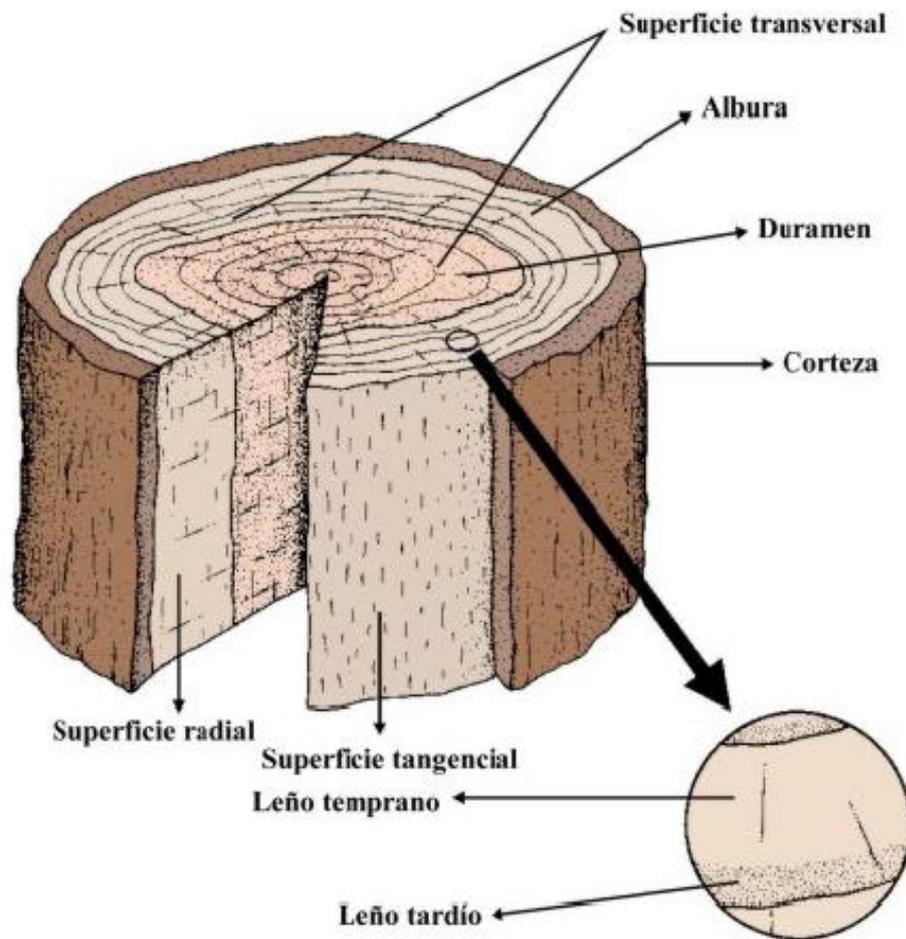
El sector maderero en la actualidad encuentra algunos productos en el mercado, pero el constante avance tecnológico es un reto al suministro de procesos y productos de preservación que prolonguen la durabilidad de la madera.

### **2.1.2 Importancia**

La madera se encuentra expuesta al ataque de varios agentes destructores, ya sea cuando está en pie (bosque) o aserrada; por lo que es necesario que quienes están en relación directa o indirecta con su aprovechamiento, tengan una real magnitud de los daños que éstos pueden causar, así como recurrir a métodos y productos efectivos y económicos que conlleven a una optimización económica de la madera.

Los tratamientos a aplicar estarán en función al volumen de madera, tipo de empresa, uso del producto: así por ejemplo: en industrias que usan volúmenes de madera apreciables se justificará la instalación de equipos e infraestructura, no así cuando se trata de pequeños talleres o medianas industrias que deben recurrir a métodos más económicos y efectivos que preserven la cantidad de madera que precisan.

### **2.2 Estructura de la madera.**



**Figura 2.1** Partes del tronco o fuste.

La madera es un material higroscópico, fibroso más o menos compacto de características anisotrópicas, anatómicamente la madera está constituida por células longitudinales y transversales de distintas características, según las funciones (tejidos) que desempeñan en el árbol. Al realizar un corte transversal en el fuste (tronco) de un árbol se puede apreciar. [1]

### **Corteza o Suber**

Es la parte protectora (tejido muerto) del árbol se diferencia a la vez la corteza interior o líber por donde se da la conducción de la sabia elaborada. Su capa exterior, está compuesta de células muertas y cumple la función de protección del fuste. Su capa interior se llama liber o floema, y está formada por células vivas, a través de las cuales se realiza el traslado y depósito de las sustancias alimenticias en el tronco.

### **El Cambiun**

Constituido por células vivas; difíciles de observar a simple vista, origina el crecimiento diametral, formando capas de células de madera o xilema en gran proporción hacia el exterior. Estas capas son los anillos de crecimiento. Es difícil de observar a simple vista, donde continuamente se forman y multiplican las células de leño.

Origina el crecimiento en grosor del tronco formando capas concéntricas de células de madera o xilema, en gran proporción hacia el interior y células de floema o corteza, en escasa proporción, hacia el exterior. Dichas capas conforman los llamados anillos de crecimiento. [2]

### **Albura**

Es la zona de coloración más clara comúnmente, conformada por células jóvenes, cumple la función de transporte de los materiales absorbidos por el sistema radicular para llevarlo hacia las hojas.

### **Duramen**

Llamado también corazón, es la zona que rodea a la médula, particularmente es de color más oscuro y está constituido por células muertas lignificadas, también conocido como tejigo xilema (xilos en griego significa madera).

### **Médula**

Es la parte central del fuste, está constituido por células débiles o muertas, a veces de resistencia corchosa, en los primeros años del árbol es la reserva de substancia alimenticia, cuando éste es talado es tejido muerto. Está constituida por células débiles o muertas, a veces de consistencia corchosa. Su diámetro varía entre menos de un milímetro, hasta más de un centímetro, según la especie.

### **2.2.1 Diferencias entre coníferas y latifoliadas.**

#### **Latifoliadas**

Desde el punto de vista anatómico el tejido leñoso de las latifoliadas tiene una estructura celular más compleja constituida por: fibras, vasos, peremquima en el cual existen ocasionalmente canales gomíferos, a estas maderas se las conoce como duras. [1]



**Figura 2.2** Árbol de forma latifoliada.

## Coníferas

Las coníferas, llamadas madera blandas, tienen una estructura celular simple formada por: traqueadas, parenquima: rodeados de tejidos parenquimáticos a veces se encuentran canales resiníferos. [3]



**Figura 2.3** Árbol de forma conífera.

### **2.3 Problemas de la madera en la preservación**

Este análisis es muy importante antes de comenzar a enfocar el tema mismo de preservación, así: **[1]**

- Los problemas de pudrición e inestabilidad dimensional, se derivan de la naturaleza y composición química de la madera, concebida en los términos de celulosa, hemicelulosa, lignina y diferentes productos extractivos. La composición química no es uniforme entre las especies así: si una especie tiene una extraordinaria resistencia al ataque de hongos, se debe a la forma como están asociados los extractivos con los elementos de la madera mientras que maderas tratadas con creosota, pentacrofenol, ciertas sales inorgánicas, resina fenólica, entre otras.
- Existen diferencias entre albura y duramen de naturaleza química, ocasionadas por la infiltración de sustancias orgánicas en el duramen, como: aceites, gomas, resinas, taninos, compuestos aromáticos y colorantes por lo que se convierte en un tejido más duro y compacto; por lo tanto tiene más resistencia al ataque de hongos e insectos.
- Las latifoliadas por poseer vasos (conducción de agua y sales minerales) y en ocasiones canales gomíferos, reaccionan con la presencia de sustancias químicas, formando pequeñas películas que restringen o impiden la penetración de preservantes.
- Maderas de peso específico alto (guayacán, chanul, otras) por la baja orientación estructural de sus elementos, tienen baja porosidad, o en

ocasiones los conductos se encuentran taponados por gomas o resinas, lo cual hace difícil la penetración de preservantes.

### **2.3.1 Influencia de la humedad de la madera en la preservación.**

El contenido de humedad influye mucho en las propiedades físico-mecánicas y por tanto en la resistencia al ataque de hongos e insectos. La humedad se manifiesta en la savia, muy perjudicial, difícil de eliminar y varía según las especies, partes del árbol e inclusive épocas del año.

Por efecto del secado, principalmente, se evapora el agua, quedando en la madera las materias disueltas, aunque algunos ácidos y aceites volátiles pasan a dicho vapor, por ejemplo: en pinos y cedros los aceites volátiles constituyen una parte apreciable de sustancias evaporadas, quedando la madera más propensa al ataque especialmente de hongos.

Los azúcares contribuyen al desenvolvimiento de manchas y ayudan a que se produzca ataques de insectos isópteros, mientras que los taninos aumentan la resistencia a la pudrición de hongos xilófagos.

### **2.3.2 Punto de saturación de las fibras [1]**

Durante el secado el primer problema que se encuentra es el transporte de humedad. La eliminación del contenido de humedad en el punto de saturación de las fibras (P.S.F.) puede causar problemas. Si las membranas de las células pierden su eficiencia por la presencia de depósitos de resinas que obstruirán la penetración de preservantes, o por modificación de otras propiedades, como físico-mecánicas que por movimientos de difusión celular impiden el ingreso de productos químicos.

### **2.3.3 Humedad higroscópica.**

La madera es un material higroscópico, trata de alcanzar el contenido de humedad de equilibrio, así las maderas de lugares húmedos tendrán mayor humedad y serán más susceptibles a la presencia de hongos o insectos, a lo inverso de aquellas maderas colocadas en un medio seco.

### **2.3.4 Estructura anatómica.**

Como ya se ha señalado es muy importante analizar estructuralmente al material y relacionar las diferentes influencias físicas y químicas que pueden interferir en algún tratamiento preservante a ser aplicado en la madera.

Maderas duras o frondosas son relativamente heterogéneas, tienen formas celulares más complejas, presentan más dificultad en el tratamiento preservador que las suaves.

El peso específico de una madera dependerá de: porcentaje de humedad, cantidad de material leñoso, sustancias extractivas, constituyentes químicos, por ello la absorción y penetración de un preservador estará en función de la densidad. Así por ejemplo: en coníferas la densidad puede influir en la penetrabilidad debido a que las capas estacionales (anillos de crecimiento) están bien marcadas, lo cual no permite el ingreso normal de un producto preservante.

#### **2.3.5 Propiedades físicas externas.**

La textura gruesa o median influye en la preservación ya que en estas capas leñosas muchas veces están presentes canales resiníferos (madera de pino) o presentan poros muy marcados (madera de roble) semicubiertos de películas que incidirán en la preservación.

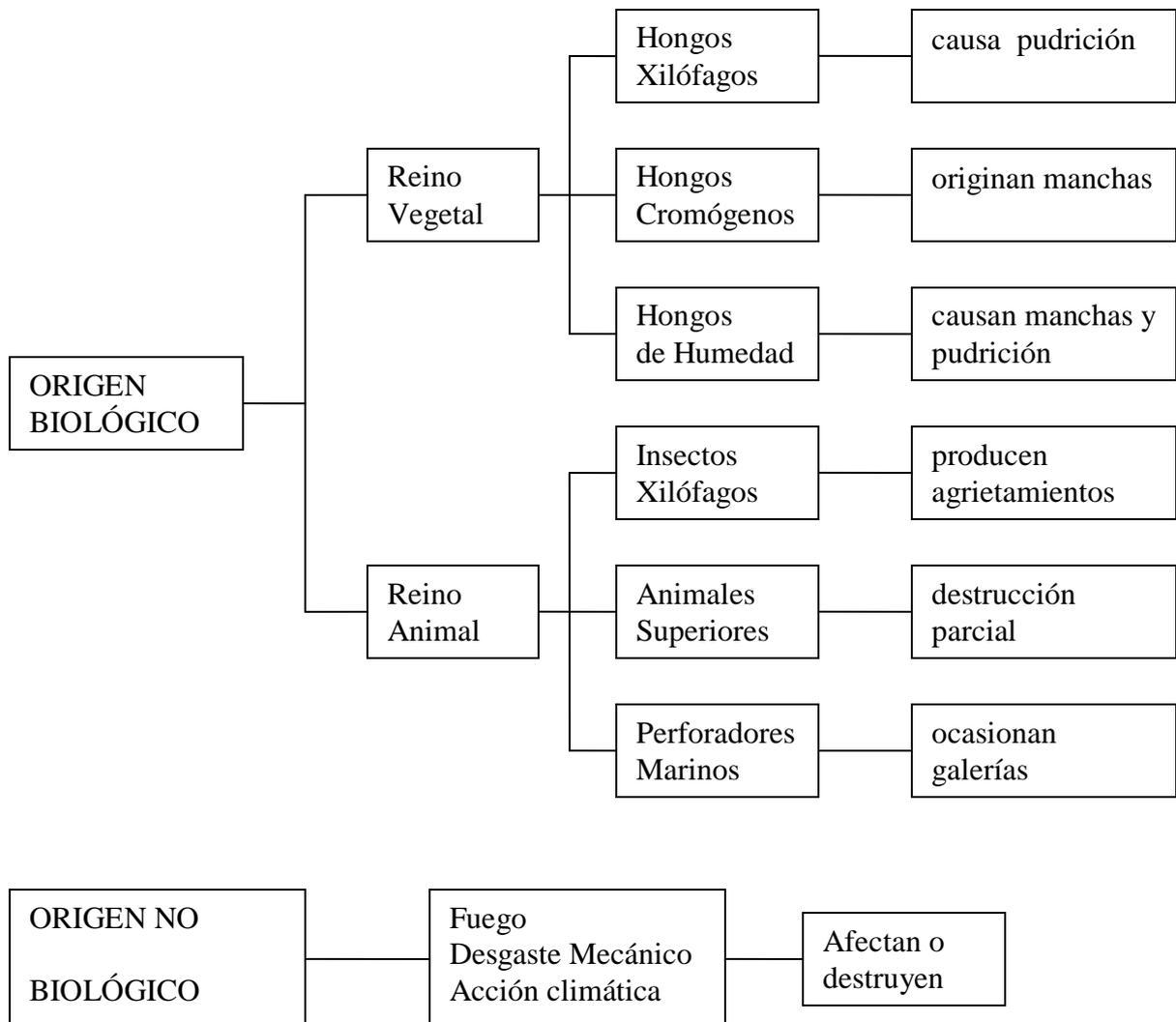
La dirección del grano ofrecerá mayor ventaja a la presencia de algún producto químico, el veteado presentará mayor o menor disposición por ejemplo, en las coníferas están presentes canales resiníferos, provocando diferencias en la asimilación del tratamiento preservador.

Las propiedades: color, olor, sabor y lustre, disminuirá o aumentará en función de la cantidad de sustancias que originan estas características en relación al tipo de producto aplicado.

#### **2.4 Agentes que afectan a la madera.**

La madera está expuesta al ataque de agentes naturales y biológicos en todo su proceso de crecimiento, desarrollo, industrialización y sitio de uso que tenga; estas acciones pueden acortar la durabilidad natural de la madera. El problema es significativo cuando grandes bosques son afectados por estos agentes, originando pérdidas de plantas o madera y/o después cuando está almacenada o en servicio. La participación del hombre tiene mucho que ver, por cuanto en ocasiones los animales domésticos destruyen pequeños bosquetes que en el futuro será madera o a la vez ocasionando perjuicios con aprovechamiento antitécnicos y otros factores como: incendios, destrucción del ecosistema, etc.

La degradación de la madera se debe a que ésta es un material orgánico y natural constituido por celulosa y lignina, que al ser sometido a ciertas condiciones de humedad, temperatura y oxígeno puede sufrir deterioro de ciertas partes del mismo, y si no son detectadas a tiempo destruyen las células que lo componen afectando y alterando sus propiedades físico-química, reduciendo su estructura natural. [4]



**Figura 2.4 Clasificación de los agentes que afectan la madera. [1]**

### **2.4.1 Agentes biológicos [1].**

Estos organismos, conocidos como hongos, son necesarios ciertos factores para su desarrollo fisiológico, como: humedad, temperatura, aire y alimento (madera).

#### **2.4.1.1 Hongos.**

El ataque de hongos en la madera requiere que tenga:

##### **➤ Humedad.**

Es un parámetro indispensable para el habitat de los hongos como: la germinación de esporas, absorción y transporte de sustancias; la humedad por encima del punto de saturación de las fibras permite el ingreso de los hongos.

##### **➤ Temperatura.**

Los hongos requieren temperaturas entre 20°-30°C; a temperaturas mayores de 30° y 40°C no desarrollan su habitat.

➤ **Aire.**

Aunque es mínimo, es necesario para la presencia de hongos.

➤ **Valor PH.**

Las maderas presentan un valor PH cercano a 5. Los hongos necesitan PH de 5-6 es decir ligeramente ácido. Para las variables: tipo de madera (coníferas o latifoliadas), climas donde vegetan las especies y tipo de material (cortezas y maderas), no se presentó variación estadísticamente significativa a un nivel de significancia de 0.05. [5]

➤ **Alimento.**

Los hongos son incapaces de elaborar sus propios alimentos, por lo que no se pueden alimentar directamente de ella, sino buscan materia orgánica preparada; en productos almacenados en las cavidades celulares, en las sustancias que compone la pared celular y/o mediante la acción enzimática que ellos segregan descomponiéndola en sustancias más simples y fácil de alimentarse.

#### 2.4.1.1.1 Hongos xilófagos. [1]



**Figura 2.5** Hongos xilófagos.

Este grupo es muy importante porque abarca una cantidad de hongos que provocan, lo que se conoce como pudrición de la madera, son capaces de desintegrar las paredes de la célula y materia orgánica especialmente cuando la madera se encuentra en pie, trozas, tablones o tablas, por tanto alteran las características físico-químicas de la madera.

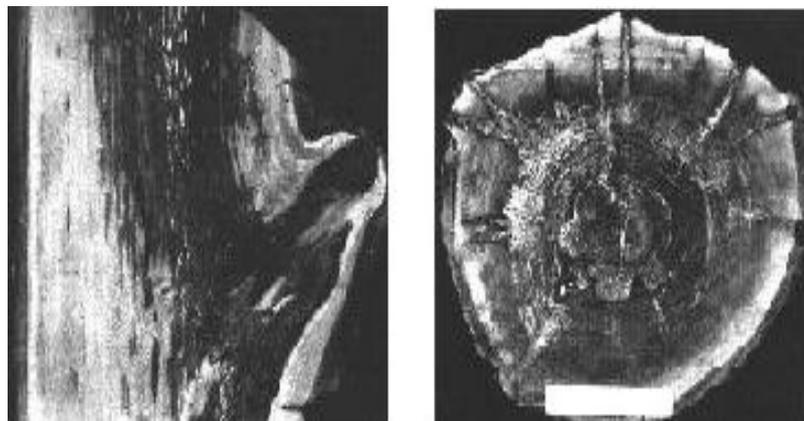
Estos hongos tienen un alto poder de propagación de una madera a otra en condiciones climática adecuadas, su difusión lo hacen a través de esporas, produciendo la destrucción de la madera. El ataque de hongos xilófagos produce:

➤ **Pudrición suave o blanda.**

Cuando se destruye la celulosa y se caracteriza por ser superficial degradando la madera hasta adquirir una consistencia grasosa de color oscuro. Ataca maderas en condiciones extremas de humedad.

➤ **Pudrición blanca.**

Cuando se destruyen todos los componentes de la madera, el material se asemeja a un esqueleto de madera sin coloración oscura. La madera se vuelve fibrosa y se parte con facilidad, produciéndose aristas angulosas en la zona de fractura. La madera afectada pierde su color característico.



**Figura 2.6** Pudrición blanca.

### ➤ **Pudrición parda o marrón.**

Se origina cuando se descompone la celulosa, la parte atacada se contrae agrietándose perpendicularmente a las fibras, tomando conformaciones cúbicas. La madera atacada presenta una coloración oscura. Para que exista el hábitat para estos hongos la madera debe tener un contenido de humedad entre 35% para adelante, así como la naturaleza del material.

### **Causas de la pudrición.**

Este fenómeno en maderas y otros materiales orgánicos es el resultado de la actividad de formas inferiores vegetales conocidas como hongos xilófagos. En el proceso de infección los hongos se desarrollan en el interior de la madera constituyendo formaciones microscópicas semejantes a hilos, éstos en conjunto se llaman MICELIO. El desarrollo estará en relación a la humedad que presente la madera, en la etapa avanzada de pudrición se pone blanda, esponjosa y fácilmente disgregable. Los factores que sirven de habitat para el desarrollo de los hongos xilófagos son:

### ➤ **Grado de humedad.**

El rango ideal del 25%-40% de humedad, la madera seca está fuera del alcance de estos hongos, aunque existe una excepción en la etapa última de pudrición parda, pueden atacar madera seca. La

madera en contacto con el suelo, lugares donde se condensa la humedad o falta aireación está expuesta al crecimiento de estos hongos.

➤ **Alimento.**

Es suministrado por la propia madera y se halla localizado en la pared y cavidades celulares en forma de azúcares, amidas, etc. que al ser sintetizado por las hifas segregan sustancias que son solubles con el agua y asimilables por estos hongos.

➤ **Oxígeno.**

Es necesario para su metabolismo 20% de su volumen de aire, en maderas que se encuentran sumergidas en la tierra disminuirá la cantidad de aire en función a la profundidad, lo que no da oportunidad de presencia de xilófagos.

➤ **Temperatura.**

Varía de 24°-32°C, fuera de este rango la acción de estos decae considerablemente.

## **Efectos de la pudrición en las propiedades de la madera [3]**

Alteran especialmente las propiedades físicas y químicas, sea por alteración del color, o por la alteración del tipo acústico, eléctrico, resistencia a la flexión, tracción y compresión. Cuando los tejidos leñosos son degradados, se produce el ablandamiento de la madera como consecuencia, destrucción parcial de las células de la corteza interior que produce dificultad en el descortezado, astillado (tableros de astilla). La reacción oxidosa se produce por la descomposición de la lignina, mientras que cuando destruyen la celulosa es hidrólisis. Cuando existe pudrición por oxidación aparece la coloración parda o marrón en la madera.

### **2.4.1.1.2 Hongos cromógenos.**



**Figura 2.7** Hongos cromógenos

Son hongos que producen manchas en la superficie de la madera, se alimentan de sustancias de reserva que se encuentran en las células parenquimáticas de la albura, no destruyen las células.

Las manchas que producen son azul, negra rojiza, castaña, marrón y gris. El azulado o mancha de la sabia es frecuente en coníferas y frondosas de coloración

blanca, se presenta en la albura debido a que contiene sustancias y condiciones apropiadas, en el duramen es muy escaso por la ausencia de estos factores y por la presencia de productos tóxicos (resinas, gomas, etc.) para los hongos.

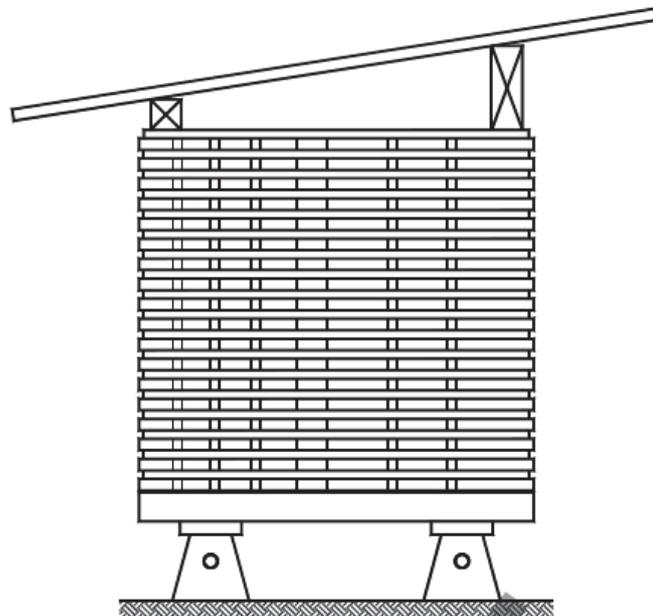
El color azulado, negro, pardo es consecuencia de la oxidación, las maderas de colores claros se manchan con mayor facilidad que las oscuras, así mismo las especies de menor densidad se manchan más. Este defecto puede aparecer en árboles en pie, por las grietas que dejan en la corteza el ataque de insectos coleópteros o herramientas mecánicas (machete, porcícula y otros).

### **Efectos de hongos cromógenos en la madera.**

En estudios realizados indican que estos hongos pueden debilitar en algo la madera, no afectan su resistencia física-mecánica. Cuando la mancha está infectada por hongos cromógenos, observada en microscopio, presenta hifas pardas oscuras que atraviesan las paredes celulares por sus cavidades, las hifas se concentran principalmente en los radios y ocasionalmente se desarrollan en otros elementos estructurales de la madera, por lo que disminuye la velocidad de secado, así como la manufacturación, almacenado e incluso en incluso en los productos acabados.

### 2.4.1.1.3 Mohos.

Es idéntico al que se desarrolla sobre el pan, queso, etc. Por lo general producen ploriferación algodonosas de color blanco al negro, pasando por todas las tonalidades. El moho se desarrolla en la superficie de la madera húmeda y es peligroso porque crea las condiciones para el desarrollo de los hongos de pudrición (xilófagos). El moho se desarrolla en madera en pie o escuadrada en patio, cuando el apilado no es el correcto.



**Figura 2.8** Apilado de la madera.

Puede ser eliminado de la maderas con el cepillado, sin afectar las propiedades de ésta.

## **Efecto de los hongos en la madera. [6]**

Los principales efectos son:

- Alteran su coloración natural.
- Reducen la resistencia físico-química.
- Alteran su composición química.
- Por lo general disminuyen su densidad.
- Reducen la capacidad acústica.
- Facilitan y dan condiciones al ataque de insectos.
- Inciden en la manufacturación y comercialización (rajaduras, torceduras).
- Disminuyen el poder calorífico.
- Aumentan la inflamabilidad.

## **Manchas químicas. [1]**

Por su composición química la madera puede presentar coloraciones causadas por alteraciones de estos elementos químicos, produciéndose oxidación o fermentaciones de los compuestos orgánicos. Este caso se manifiesta en maderas de baja densidad y preferentemente de coloración clara, aunque también se presenta en maderas duras. Las manchas aparecen comúnmente durante el proceso de secado, la coloración más frecuente es parda, cuya gama va del amarillo al pardo oscuro.

## 2.4.2 Agentes destructores de origen animal [1]



**Figura 2.9** Insectos destructores de la madera.

En especial por insectos del orden coleóptero, conocidos vulgarmente como escarabajos y los isópteros llamados termitas (comógenes u hormigas blancas). Algunos insectos atacan la madera en pie, carcomen las hojas, raíces y/o algunos viven bajo la corteza, mientras otros devoran la madera, éstos dos tipos de insectos son muy peligrosos cuando atacan a madera en servicio.

### **Insectos xilófagos.**



**Figura 2.10** Insectos xilófagos.

Esta clase de insectos causa muchas pérdidas, especialmente en bosques tropicales y subtropicales, al atacar a los árboles en pie, o luego cuando es trozada, aserrada. En estado larvario estos insectos causan más daño, también en forma adulta como el caso de los termes.

Los estados de huevo, pupa e imago son por lo general de corta duración (días, hasta semanas), el tiempo más largo es el larvario, porque él deteriora más la madera y así cumple su ciclo biológico, para esto requiere de:

➤ **Humedad.**

Es un factor que condiciona hasta cierto grado la presencia de los insectos y en tal sentido se distinguen dos grupos: insectos de madera verde que son los que actúan en árboles recién cortados que tienen un alto contenido de humedad natural e insectos de madera seca localizados especialmente en madera usada en la construcción, muebles y otros enseres secos.

➤ **Temperatura.**

Está en función a la especie así por ejemplo requieren temperaturas entre 28°-30°C ó 22°-23°C, estas diferencias se deben a que los insectos requieren, para su metamorfosis diferentes temperaturas para regular la temperatura de su cuerpo.

### 2.4.2.1 Termes [7]

Son insectos del orden isópteros, se puede decir que son los más peligrosos y causantes del deterioro de la madera en uso, invaden la madera en forma de colonias organizadas comúnmente, así: castas reproductoras, soldadas (ninfas) y obreros. Estos insectos viven en nidos que hacen en el suelo, en el fuste y/o en las ramas de los árboles.



**Figura 2.11** Termita y sus efectos.

Los sitios de preferencia de los termites son húmedos y oscuros, huyen de la luz, razón por la que siempre atacan madera interna, por lo que se torna difícil detectar.

Para mejor apreciación se los clasifica en función de sus hábitos:

- Termites de madera seca.
- Termites de madera húmeda.
- Termites subterráneas.

#### **2.4.2.2 Coleópteros [1]**

Conocidos también como escarabajos, generalmente presentan un cuerpo endurecido, poseen piezas bucales masticadoras, comúnmente se les conoce como gorgojos, picudos, escarabajos, vaquitas, etc. Por lo general son pequeños, se alimentan de materia vegetal y animal viva o muerta, ya sea en estado larvario como adulto, éste pone sus huevos sobre la corteza cuando ataca árboles en pie, siendo el estado larvario el causante de la destrucción.

Estos insectos se caracterizan por:

- Atacar madera con o sin corteza.
- Ataca maderas nuevas, secas o viejas.
- Su ciclo larval es bastante largo (3-15 años)
- Cavar galerías reduciendo la madera a fino polvillo.

Muchas veces las galerías pasan desapercibidas, el insecto taladrador rara vez denuncia su presencia ya que sigue la dirección paralela al eje de las piezas y porque deja por lo menos una capa delgada de madera a veces de solo a,5mm de espesor para separar a su galería del exterior. El hábitat de estos insectos está en relación al contenido de humedad, el grado de pudrición y la presencia de albura en la madera. Cuando ésta es atacada, presenta perforaciones en la superficie y la presencia de pequeñas pilas de polvillo de algo áspero al tacto. Los túneles se vuelven más anchos a medida que la larva crece, logrando diámetros de casi 2

mm, las galerías van en dirección paralela al eje de la madera, aunque también se localizan perpendiculares a la misma.

### **2.4.3. Agentes no biológicos [1]**

#### **2.4.3.1 Fuego.**

La madera es un material inflamable, lo cual origina riesgos especialmente en la construcción, cuando una madera se calienta, el calor se consume con mayor facilidad por la reacción endotérmica que se produce, a partir de 250°C comienza la reacción exotérmica elevándose la temperatura rápidamente, favoreciendo el grado de combustión y el desarrollo de gases inflamables. Aplicando temperaturas sobre 400°C todas las especies se inflaman. En elementos de madera donde su estructura está formada por grandes secciones transversales, son más resistentes al fuego que cualquier otro material de construcción.

#### **2.4.3.2 Factores climáticos.**

La madera sufre deterioro cuando se encuentra expuesta a la intemperie, provocada por la acción combinada de agentes climáticos afectando a su comportamiento y estética. Así los cambios y/o fluctuaciones constantes de temperatura y humedad causan contracción especialmente cuando las piezas provienen de cortes en sentido oblicuo (según orientación en el fuste), también puede perder resistencia cuando aumenta el contenido de humedad. La contracción y el hinchamiento de las capas superficiales de la madera ocasionan

pequeñas grietas y desfibramiento. En la construcción los árboles y desprendimiento de piezas es consecuencia de los cambios de humedad, así como la pudrición y ataque de hongos. La presión que ejerce, el viento arrastra partículas de polvo y arena que golpean la madera contribuyendo a su desgaste. Los efectos químicos y abrasivos como la corrosión, son provocados por elementos acarreados por vientos que son depositados en la superficie de la madera, ante el oxígeno del aire y la presencia e los rayos solares, afectan considerablemente la integridad de este material.

Igualmente otros factores ambientales causan deterioro en la madera, como la influencia de la luz (las ondas cortas de la radiación de la luz) que con el tiempo trae como consecuencia la pérdida de coherencia en los tejidos de la superficie.

#### **2.4.3.3 Desgaste mecánico. [7]**

La madera cuando está sometida a condiciones de movimiento y de tensión, sufre desgaste mecánico ocasionando menor durabilidad, ejemplo: puentes, durmientes del ferrocarril, pasos a desnivel. El desgaste mecánico se puede controlar o disminuir a base de productos oleosolubles, porque al estar la madera lubricada resiste en mayor proporción el rozamiento con otros materiales, la aplicación de pinturas al aceite es recomendable en zonas o lugares donde la madera está en contacto con arena, lo que impide la acción abrasiva.

## **2.5 Preservantes de la madera y su clasificación**

### **2.5.1 Preservantes de la madera [1]**

La industria de la preservación de la madera se viene desarrollando desde principios del siglo XIX, el apareamiento en el mercado de nuevos productos y la constante investigación técnica aplicada; son considerados de suma importancia en el sector maderero. Los preservantes son sustancias químicas que seleccionados y aplicadas convenientemente a la madera proporcionan mayor durabilidad, evitando y/o contrarestando la acción destructora de agentes externos.

### **2.5.2 Características de un preservante**

Debe reunir las siguientes características:

#### **➤ Toxicidad.**

Deben ser productos letales para los agentes destructores e la madera de permanencia prolongada, la dosis mínima letal de cada preservante está dada por la menor cantidad d producto químico activo, en relación al sustrato necesario para eliminar el agente destructor. Sin embargo deberán de ser de baja toxicidad para los seres humanos. La aplicación de cantidades menores en relación a la proporción (dosis) mínima letal solo inhiben el desarrollo de los organismos xilófagos, pero no los elimina.

➤ **Penetrabilidad.**

La penetrabilidad depende del grado de viscosidad del producto; así como del método empleado, contenido de humedad, densidad y permeabilidad de la madera, entre otros. La humedad de la madera en unos casos perjudicial en un tratamiento, sin embargo en métodos, como ósmosis, difusión, facilita la penetrabilidad del producto químico. Productos de alta viscosidad como la creosota impide la penetración del preservante, una reducción de viscosidad se conseguirá aplicando temperaturas adecuadas en el proceso de impregnación facilitando la penetración.

➤ **No corrosivos.**

No deben ser corrosivos a los metales (clavos, pernos, etc.); las multisales tienen agregados de cromatos alcalinos con el objetivo de fijar los componentes y contrarrestar la acción corrosiva de algunos compuestos ácidos.

➤ **No combustibles.**

No ser inflamable antes o después de aplicar en la madera, tampoco alterar el poder de combustión del material tratado. Las sales solubles en agua contrarrestan los incendios, en cambio la creosota y el pentaclorofenol poseen cierto grado de inflamabilidad.

➤ **Poder residual.**

Poseer alto poder residual que garantice duración prolongada y que conserve el grado de toxicidad, a la vez bajo poder volátil que su fijación sea permanente, que no se alteren por lixiviación, volatización o por cambios químicos.

➤ **Inocuidad.**

Que sean inofensivos para el hombre y animales, por ser productos químicos se debe seguir las recomendaciones de los fabricantes estrictamente.

➤ **Aplicación.**

La aplicación de los preservantes en la madera no debe permitir dificultades, aunque este factor está en función al tipo de industria, especie, usos, etc.

➤ **Permitir acabados.**

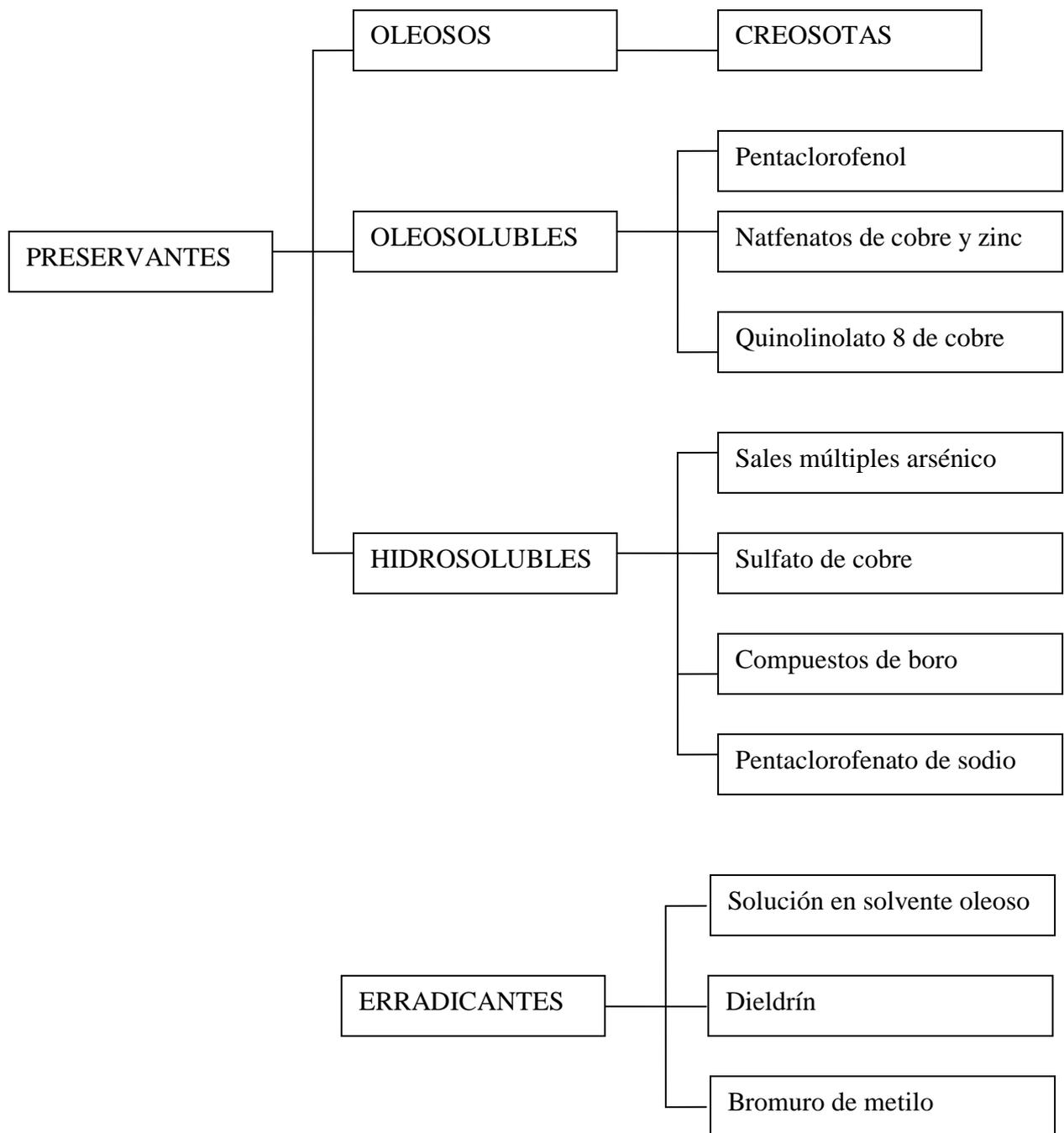
Que no impidan o deterioren los diferentes tipos de acabados, ni afecten las propiedades estéticas físico-mecánicas.

➤ **No fitotóxicos.**

En la agricultura muchas veces se usa madera impregnada, como estacas, por lo que no debe exudarse al preservante contaminando el producto y/o el ambiente.

### **2.5.3 Clasificación de los preservantes [1]**

Los preservantes se clasifican en relación a su origen y son:



**Figura 2.12** Clasificación de los preservantes [1]

### **2.5.3.1 Preservantes oleosos [7]**

Son preservantes que usan como disolvente, aceites pasados, aceites combustibles (diesel, kerex, kerosene, etc.); en este grupo se incluye subproductos de la hulla, alquitrán de hullas, soluciones creosota-alquitrán y otros; el más utilizado y efectivo es la creosota que es una mezcla de hidrocarburos aromáticos, sólidos y líquido; contiene notables cantidades de ácidos y bases de alquitrán, es más pesada que el agua. La creosota aplicada en la madera reduce la corrosión y el desgaste mecánico por lubricación; no es recomendable su uso donde exista contacto por su poder exudante, olor desagradable. Se usa en nuestro medio para preservar postes, durmientes, pilotes, etc. Características para el uso:

- Alta toxicidad contra hongos e insectos xilófagos.
- Insoluble en agua.
- Se localiza su poder de penetración debido a su color oscuro.
- No tiene acción corrosiva para los metales.
- Por su olor fuerte no es recomendable en ambientes (sillas viviendas, vigas, etc.)
- No permite acabados por dejar el material sucio y manchado.
- Exudación significativa en épocas soleadas.
- Exige maderas con un 15-20% de humedad, en función de la especie, se requiere de 3 a 6 días para el tratamiento.

### **2.5.3.2 Preservantes oleosolubles (productos orgánicos) [7]**

En este grupo se ha generalizado el uso de: pentaclorofenol y en algunos países el naftenato de cobre. Son soluciones en solventes oleosos derivados del petróleo. Estos productos tienen gran poder de penetración, no son inflamables y admiten acabados. Características para el uso:

- Alta toxicidad contra hongos e insectos xilófagos.
- No es muy volátil (estabilidad química).
- Facilidad de penetración, gran permanencia en la madera.
- Usando solventes adecuados no registran olor en el material tratado.
- Madera recién tratada posee alto grado de inflamabilidad, debido a la presencia del solvente (volatizado decrece).
- Es irritante para la piel y las mucosas (evitar contacto con el producto).

### **2.5.3.3 Preservantes hidrosolubles (inorgánicos). [8]**

Los preservantes hidrosolubles son los más generalizados en la impregnación de la madera, son sustancias o mezclas de sustancias químicas que emplean como solvente agua o como medio emulsionante o suspensivo. Esta última forma (emulsiones y suspensiones) se refiere al empleo de insecticidas que como productos puros son insolubles en agua, pero pueden ser presentados por sus fabricantes como emulsión o como polvo mojable; de esta manera pueden ser incorporados al agua para ser utilizados en baño de inmersión o pulverización. En las multisaes (sales dobles) en su composición están presentes fungicidas e

insecticidas, la mayoría de los preservantes hidrosolubles protegen de hongos e insectos.

Es ventajoso el uso por conocerse perfectamente sus componentes y sus porcentajes en la formulación, su transporte es sencillo por ser polvos o pastas.

Características para el uso:

- No desprenden olores desagradables.
- Presentan menos viscosidad que los otros.
- Reciben materiales de acabados.
- No son inflamables; algunos una vez que la madera ha entrado en combustión, favorecen la combustión.
- Algunos preservantes no son tóxicos para el hombre.
- Son tóxicos para hongos e insectos.
- La temperatura máxima de utilización no debe pasar de los 60°C, caso contrario puede ocurrir la descomposición del material.

### **2.5.3.3 Preservantes erradicantes. [8]**

Solución en solvente oleoso pertenece a esta familia de preservantes está compuesto por un polvo cristalino color blanco o crema de olor agradable, sufre alteraciones en presencia de sales de aluminio y de hierro que actúan como catalizadores, es insoluble en agua. Características para su uso:

- Compatible con la mayoría de plaguicidas.
- Buen efecto residual.
- Volatilización a temperatura ambiental nula.
- No almacenar en envases de aluminio o hierro.
- Dosis 2% de ingrediente activo.

Por otro lado el dieldrín es un insecticida insoluble al agua pero soluble en solventes orgánicos, es menos volátil que el anterior y este se funde a 150°C.

Características para su uso:

- No tiene olor apreciable.
- Compuesto estable.

Por último se tiene al bromuro de metilo que es un líquido incoloro y sin olor, presenta toxicidad baja para los insectos en relación a otros. Características para su uso:

- Posee una rápida y profunda penetración a la presión atmosférica.
- Terminado el tratamiento, sus vapores se disipan rápidamente.
- No es inflamable, ni explosivo en circunstancias normales.
- Generalmente viene premezclado con un gas de alarma para ser detectado, puesto que no tiene olor.
- El hombre no debe exponerse a concentraciones elevadas (8 horas).  
Puede causar la muerte.

- La aplicación del preservante requiere que el personal tenga el equipo de protección completo.
- La dosis recomendada es 200 gramos por metro cúbico de agua.
- El tiempo de exposición mínimo es de 48 horas.

## **2.6. Preparación de la madera para el tratamiento [4]**

La preparación es el punto de eficiencia en la preservación y puede ser:

### **2.6.1. Descortezado**

La corteza es impermeable, obstruye la penetración de los preservantes, el descortezado puede ser manual o mecánico, manualmente se lo realiza mediante golpes con un martillo grande y mecánicamente con un aserradero de gran capacidad o también denominado de montaña.

### **2.6.2. Secado**

Secado se recomienda hacerlo a la interperie hasta estabilizar la madera hasta el punto de saturación de las fibras, para no tener mayores deformaciones al utilizar los secaderos. Pero en el caso de requerir un secado emergente utilizar la cámara de secado con un programa suave de secado.

## **2.7. Propiedades de la madera preservada.**

La vida útil de la madera y el tipo de tratamiento químico debe adaptarse en cada caso, así por ejemplo: no se puede conseguir una penetración profunda usando brocha, pulverizador o si el caso se debe usar tanques de inmersión o autoclaves. La madera preservada presenta las siguientes características:

### **2.7.1. Buen encolado**

Especialmente cuando se practica el corte o perforación antes de preservarla, lo que permite una buena calidad de encolado.

### **2.7.2 Inflamabilidad**

Es aconsejable el uso de productos hidrosolubles con el objeto de garantizar y minimizar los índices de incendios, sin embargo se debe tener precaución en las concentraciones elevadas de ciertas sales que pueden cambiar notablemente la resistencia mecánica de las maderas.

### **2.7.3. Resistencia**

Esta es la mayor característica que presenta la madera tratada, obteniendo capacidad de soportar factores adversos (insectos, hongos, etc.) especialmente cuando está en uso. El grado de permanencia deber ser considerado como una de

las propiedades fundamentales ya que la resistencia está limitada por el grado de absorción y penetración que tenga el preservante en la madera.

## CAPÍTULO III

### 3. SECADO DE LA MADERA

#### 3.1 Teoría del secado.

##### 3.1.1 Conceptos Básicos [3], [9]

**Secamiento:** Es el proceso de eliminar el exceso de agua de la madera para facilitar su posterior procesamiento y regularidad. Pero el concepto de secado va más allá de una simple definición, abarca el conocimiento de la materia prima, de su comportamiento y de los equipos utilizados para adelantar un procesamiento óptimo. Uno de los procesos más exigentes en la preparación de la madera para usos industriales y domésticos es el secado. De hecho, de su correcto desarrollo depende que este material ofrezca buenos resultados durante y después del proceso de transformación. Las consideraciones físicas y mecánicas de la materia prima así como las técnicas que se refieren al tipo y manejo de los equipos escogidos para esta práctica son aspectos fundamentales cuando se planea adelantar un secado. Un aspecto a tener en cuenta en el proceso de secado es la densidad de la madera o dicho de otra manera, su peso y dureza, determinados por la cantidad de células existentes en su conformación; es decir, que a mayor número de células mayor dureza en la madera y a un menor número se tiene una madera más blanda, comparándolas ambas, en un mismo volumen. Así, la madera más densa es más difícil de secar que la menos densa debido a la mayor cantidad de paredes celulares que contiene.

El término densidad está estrechamente relacionado con la presencia de agua en la madera, que puede ser de las siguientes formas: Agua libre o capilar, agua de saturación y agua de constitución. La primera se encuentra en el interior de las cavidades celulares (de fácil y rápida extracción) y su eliminación no modifica apreciablemente la madera. Eliminada ésta, el contenido de humedad de la madera será del 30% aproximadamente. Este es el llamado punto de saturación de las fibras (PSF).

La segunda, el agua de saturación, es aquella que se encuentra en las paredes celulares, durante el proceso de secado de la madera, cuando ésta ha perdido su agua libre por evaporación y continua secándose, la pérdida de humedad ocurre con mayor lentitud hasta llegar a un estado de equilibrio higroscópico con la humedad relativa de la atmósfera circundante. Para la mayoría de las especies el “equilibrio higroscópico” está entre 12% y 18%, por último el agua de constitución caracterizada por ser la 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 madera

Por lo anterior, puede afirmarse que existen dos etapas bien definidas en el proceso de secado: La eliminación del agua libre hasta el punto de saturación de la fibra, y la eliminación del agua de impregnación hasta el 7 por ciento máximo, contenido de humedad, ideal para el uso de madera en muebles de gran calidad.

La primera etapa generalmente es fácil y rápida, mientras que la segunda es mucho más compleja y demorada debido a la dificultad de eliminar el agua adherida a las paredes celulares.

### **3.1.2 Ventajas del secado de madera**

- Medida de protección de la madera contra hongos.
- Ventaja económica para el transporte de la madera.
- Mayor estabilidad dimensional, disminuyendo la presencia de defectos.

### **3.2 Métodos actuales para el secado**

En general, existen varios sistemas de secado basados, casi todos, en el principio antes descrito de equilibrado de la madera a las condiciones de la cámara, exceptuando el secado al vacío y el secado por radio frecuencia que lógicamente se encuentran dentro del grupo de secado artificial, sistemas cuyo principio y funcionamiento es muy diferentes a los tradicionales; pero los siguientes son los más empleados: **[9]**

- Secado natural.
- Secado artificial ( cámaras de secado).

### 3.2.1 Secado Natural [4], [6]

Es el primero, el más antiguo y es considerado por muchos, el mejor; de hecho se aplica frecuentemente en distintos lugares del mundo y para diversos casos, pero en especial cuando no se cuenta con recursos para montar otros sistemas.

En el secado al aire libre se apilan las tablas de madera sobre listones, con separaciones de hasta 45 cm. Normalmente estas pilas de madera se ubican separadas del piso y en lugares resguardados de la lluvia y del sol. El paso del aire a través de las pilas las va secando progresivamente. En realidad existen muchísimas maneras para secar naturalmente: desde los encastillados particulares hasta prácticas que incluyen creencias esotéricas. Pese a lo popular de esta modalidad, el sistema tienen como principal inconveniente el elevado tiempo que demanda difícil de establecer pues depende de variables como la cantidad de luz solar, la velocidad del viento, la condensación y humedad relativa ambiental, entre otros y la reducida homogeneidad en los resultados, pues no toda la madera seca de igual forma, razón por la que no se puede establecer con exactitud la humedad final que generalmente, no baja del 20 por ciento con éste sistema.

Las tablas son apiladas horizontalmente sobre separadores que deben responder a ciertas exigencias concernientes a; la especie, el espesor, el espaciado y el alineamiento. Las pilas así constituidas son almacenadas fuera y bajo abrigo, hasta que la humedad final sea alcanzada. Esta humedad final depende de; la duración del almacenamiento, de la estación y de las condiciones

de almacenamiento. Una vigilancia periódica es útil para prevenir los riesgos de depreciación de la madera.

### **3.2.1.1 Precauciones y procedimientos previstos [6]**

#### **Precauciones:**

Cuando la madera es secada al aire libre, esta debe ser protegida de la intemperie, pero también y sobre todo de los rayos solares, a riesgo de provocar una degradación tales como las rajaduras y deformaciones. De una manera general; las latifoliadas presentan rajaduras y las coníferas la mancha azul. Por lo que el secado en un cobertizo o hangar abierto es una solución muy satisfactoria. También es importante tener en cuenta la dirección del viento dominante para determinar la orientación de las pilas de madera y la naturaleza de la protección a utilizar.

#### **Procedimientos previstos:**

Para acelerar el secado es necesario considerar; pasadizos ventilados, arreglo de las pilas y acondicionamiento del suelo.

Proceso que se puede acelerar mediante la instalación de ventiladores, esto último para incrementar el flujo de aire y mejor distribución a través de la pila de piezas de madera a secar.

Para preservar la calidad de la madera aserrada, hay que considerar la aplicación de productos antirajaduras y dispositivos de protección para la lluvia y rayos solares.

### **3.2.1.2 Ventajas y desventajas del secado al aire libre.**

#### **Ventajas del secado al aire:**

- Método que da buenos resultados de secado, sin instalaciones costosas.
- No utiliza ninguna fuente de energía que incremente el costo de producción.
- No necesita de personal muy calificado.

#### **Desventajas del secado al aire:**

Esto provoca las siguientes depreciaciones:

- Mecánicas como las rajaduras y las deformaciones.
- Biológicas por los insectos y los hongos.
- No permite de llegar a la humedad de la madera, que sea compatible con la humedad que se requiere para los usos en el interior de recintos habitables.

- El equilibrio higroscópico de la madera, varía entre el 13% y el 16%. El secado natural es por consiguiente insuficiente para muebles y madera, de uso en obra de interiores.
- Este método es lento, por lo que necesita de una gran superficie de almacenamiento, y un mayor tiempo de retorno financiero.

Hay un costo ligado a la adquisición, manejo y mantenimiento del patio de secado de madera y de dispositivos de protección.

- La inmovilización de capital correspondiente al precio de la madera aserrada almacenada.
- Necesidad de protección permanente a nivel de piezas de secado; hongos, rajaduras.
- Proceso que no destruye ni los insectos ni los hongos.

### **3.2.1.3 El tiempo de secado en forma natural [7].**

El tiempo de secado, especialmente depende de los siguientes factores:

- Especie de la madera.
- Espesor de la madera.
- Contenido de humedad inicial y final.
- Temperatura de secado.
- Humedad relativa ambiental.
- Velocidad de flujo del aire o del viento.

El secado de la madera que va hasta un contenido de humedad que equivale al punto de saturación de la fibra y luego hasta un 15-20% de humedad, mediante el secado natural no causa mayores problemas. Para secar la madera naturalmente y llegar a un a un 20% de humedad, se requiere aproximadamente de unos 30-40 días por cada centímetro de espesor de la madera. Es difícil secar la madera por este sistema, hasta lograr 10-12% de humedad. Para obtener este estado se necesita aproximadamente de 5 a 7 meses por cada centímetro de espesor de la madera. Esto significa, que una empresa o taller debería tener apilado el consumo de madera de unos 2 o 3 años en el patio de madera.

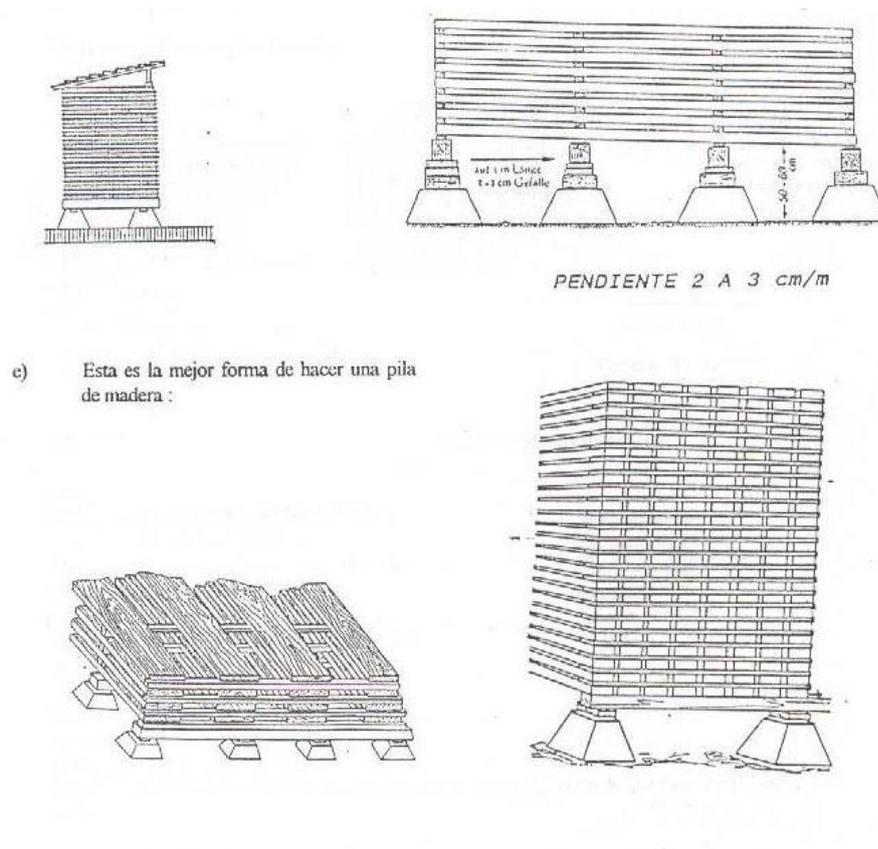
#### **3.2.1.4 Características del terreno**

Las condiciones requeridas para un patio de secado óptimo son los siguientes:

- Suelo preferentemente de hormigón armado; los terrenos húmedos, así sean bien drenados y próximos a ríos o fuentes de agua, favorecen el desarrollo de hongos.
- Emplazamiento próximo al centro de transformación (aserradero), con diseño de caminos de acceso suficientes a la capacidad y facilidad de movilización de los volúmenes de secado.
- Caminos principales, de 5 a 6 metros de ancho, enripiados o de cemento.
- Caminos secundarios, de 0.5 a 1.5 metros de ancho, para permitir la circulación del aire entre las pilas de madera.
- Localización sistemática de puntos de agua.

- Se debe efectuar una adecuada limpieza del patio, lo cual implica que no exista vegetación ni madera u otra materia orgánica en descomposición que pueda ser agente de infestación o de infección de organismos de deterioro de la madera a secar.

### 3.2.1.5 Apilado de madera y sus elementos [7]



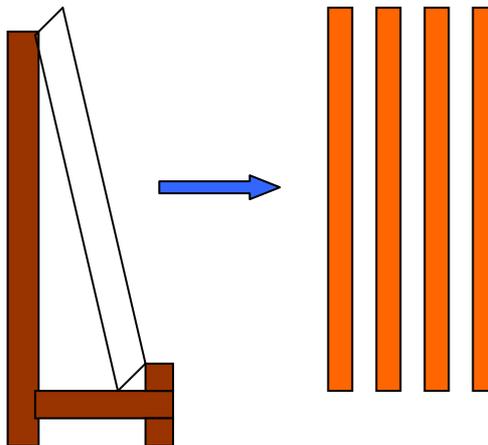
**Figura 3.1** Apilado de la madera.

Para un correcto apilado horizontal de la madera, se debe de tener en cuenta los siguientes elementos principales:

- Bases o cimientos
- Listones separadores
- Tiros y chimeneas
- Elementos de protección de las pilas cubiertas o techos y protectores laterales
- Ancho de las pilas
- Altura
- Orientación de las pilas.

### 3.2.1.6 Tipos de apilado de la madera [4]

**Apilado vertical:**



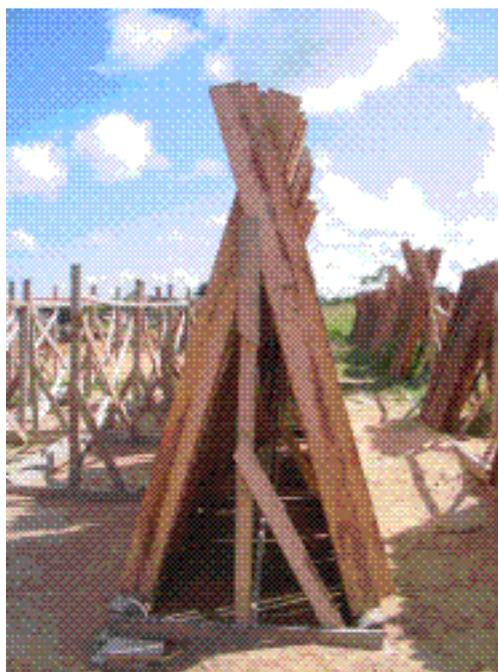
**Figura 3.2** Apilado vertical.

**Apilado horizontal:**



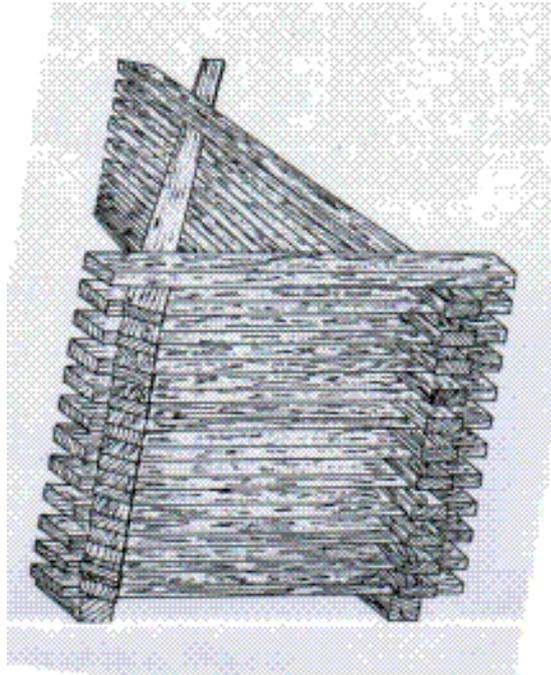
**Figura 3.3** Apilado horizontal.

**Apilado en caballete:**



**Figura 3.4** Apilado en caballete.

### **Apilado en triángulo:**



**Figura 3.5** Apilado en triángulo.

#### **3.2.1.6 Duración del secado al aire [7]**

El tiempo de secado al aire de una madera depende de las variaciones climáticas del lugar y del contenido de humedad inicial de la madera. Debe establecerse un tiempo de secado que permita que las maderas apiladas tengan un contenido de humedad similar al contenido de humedad de equilibrio de la zona en la que se está efectuando el secado.

Generalmente se presentan variaciones importantes en la duración del secado al aire. Para secar al 20% de humedad, tablas de 27 mm de espesor, hace falta en promedio de al menos 10 meses para maderas de difícil secado (eucalipto).

La duración del secado al aire para maderas duras y mayores a 54 a 75 mm de espesor, es del orden de 2 a 3 años.

La duración del secado al aire es variable y depende de:

- La naturaleza de la madera.
- Espesor de la madera.
- El tipo de corte de la madera; radial o tangencial. La humedad circula fácilmente en sentido de los radios que en el sentido tangencial, por consiguiente; las piezas de madera aserradas en sentido tangencial secarán mas rápidamente que las aserradas en sentido radial.
- El clima del sitio de secado; por ejemplo; para tablas de 25 cm. de espesor, de menos de 0.45 de peso específico, en clima tropical húmedo, y para llegar a un promedio de 20% de humedad, se requerirán de 50 a 60 días. Para la misma pieza de madera, en clima seco y templado solo se requerirán un promedio de 30 días.

### **3.2.2 Secado artificial [9]**

Referido al secado por aire caliente climatizado, donde el proceso de secado es efectuado con temperatura, humedad controlada y ventilación forzada, con la finalidad de reducir significativamente el tiempo de secado de la madera hasta humedades requeridas y por general por debajo del punto de humedad de equilibrio del medio ambiente exterior. Este tipo de secado se basa en evacuar el

aire caliente saturado o casi saturado de la cámara y reemplazarlo por aire menos húmedo a temperatura ambiente.

Se realiza en recintos cerrados, dentro de los cuales se aplican climas artificiales progresivamente más cálidos y secos. Estos equipos toman el nombre de cámaras de secado, que están equipados con sistemas de inyección de aire, calefacción, humidificación, control y registro de las condiciones ambientales interiores. Un secador industrial moderno debe presentar los siguientes elementos principales: ventiladores, ventilas, deflectores de aire, calefactores, trampas de vapor y controles del ambiente de la cámara y de la madera.

#### **3.2.2.1 Parámetros que influyen los tiempos de secado [3]**

- Humedad inicial y humedad final requerida.
- Condiciones de apilado; espesor de los separadores y longitud de las pilas o paquetes.
- Equipo de regulación del proceso de secado; manual, semiautomático, automático.
- Equilibrado inicial de la madera; presecado.
- Los incidentes de secado; corte de corriente, falla en los dispositivos de control, falla en los equipos.

### 3.2.2.2 Equipo de secado

La descripción de secado generalmente va a estar referido al método de secado por aire caliente climatizado, es decir, al secado de madera en base a aire caliente y húmedo y a flujo forzado de viento.

Los secadores son constituidos por los siguientes equipos:

- Una cámara aislada térmicamente para mantenerlo estable frente a las variaciones del clima exterior y limitar los gastos de energía.
- Ventiladores para poner el fluido secante al contacto del producto a secar.
- Equipos de humidificación, para calentar el poder secante del fluido de secado.
- Equipos de calor para el aporte de energía.
- Equipos de extracción para la evacuación del agua bajo forma de vapor.
- Equipos de control y registro; del ambiente de la cámara y de la madera.



**Figura 3.6** Cámara de secado.

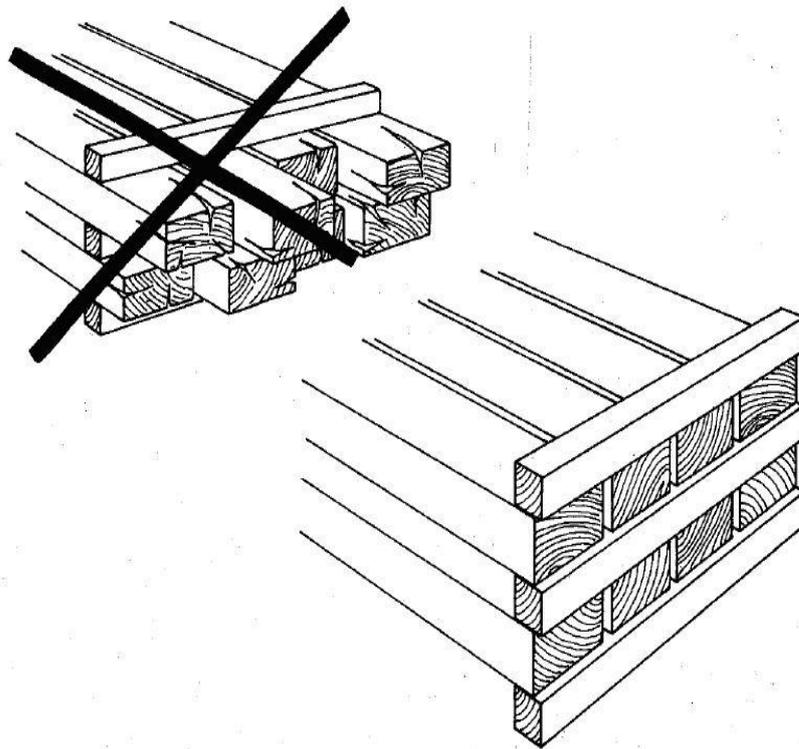
### **3.2.2.3 Preparación de las cámaras de secado**

Previo al secado de cada carga de madera, se debe verificar el buen funcionamiento de los sistemas que la componen, generalmente son; los sistemas de calefacción, ventilación, humidificación, control y registro, además de una verificación final de la estructura, elementos de aislamiento térmico, de prevención y seguridad.

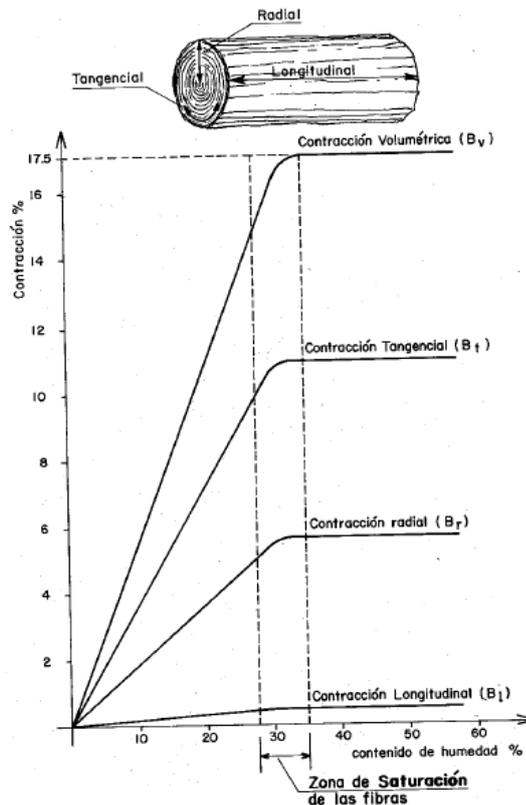
#### 3.2.2.4 Carga de la cámara de secado.

Para el cargue en la cámara de secado hay que seguir algunas de las siguientes reglas simples para obtener buenos rendimientos:

- Es deseable de secar lotes homogéneos de madera, en; especie, espesor, humedad inicial y de ser posible, tablas del mismo tipo de corte (radial o tangencial).



**Figura 3.7** Apilado en la cámara de secado.



**Figura 3.8** Contracción de la madera.

- En caso de diferentes especies, se tiene que agrupar las especies que tengan un comportamiento similar al secado.
- En caso de espesores diferentes, es necesario agruparlo en espesores vecinos; por ejemplo de 23 mm a 27 mm, de 36 mm a 40 mm, etc. [9]



**Figura 3.9** Apilado incorrecto.

- En caso de secar diferentes especies y/o calibres y/o humedades iniciales; se debe seguir la tabla de secado correspondiente a la de la especie más delicada de secado, a la de mayor espesor y a la más húmeda.

- En caso de mezclar especies de fácil secado, presecadas, o muy delgadas en espesor, con especies difíciles o muy húmedas; se tiene que utilizar el secado por más tiempo, con el riesgo adicional de que las primeras maderas se sequen más de lo deseado; para lo cual la fase de calentamiento debe ser en un ambiente saturado de humedad.
- La mezcla de especies y humedades, deben ser en lo posible evitado, ya que sería la fuente de incremento de riesgo a las deformaciones o colapso de la madera y a obtener niveles bajos de calidad, con la consiguiente pérdida de dinero y credibilidad.
- Hay que considerar que el volumen de una cámara de secado es de 5 a 7 veces mayor que le volumen de la madera a secar, por lo que no es recomendable aumentar el coeficiente de llenado, bajando el espesor de los separadores de madera, ya que impediría circular el aire a través de la pila de madera. Se recomienda las siguientes dimensiones de los separadores para los diferentes espesores de la madera a secar.

**Tabla 3.1 Espesor de los separadores [10]**

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

- Se debe estar atento a no poner madera en los pasadizos que son reservados a la circulación de aire y ventilación, ya que impide la homogeneidad y rapidez de secado.

Por lo anterior, hace falta decidir de;

- Secar simultáneamente maderas recién cortadas con las ya presecadas.
- Completar el lote con especies diferentes.

Estas soluciones anteriores, conducen a una mala utilización del secador.

### **3.2.2.5 Defectos de secado**

En el proceso de secado se pueden producir los siguientes defectos de secado:

- Colapso.
- Tensiones internas en el transcurso del secado.
- Rajaduras, deformaciones y daños debidos a un secado mal conducido.
  - Deformaciones.
  - Rajaduras superficiales.
  - Rajaduras internas.
- Variación de coloración
  - Mancha azul
  - Manchado por separadores
  - Decoloración

### 3.2.2.5.1 Colapso

En el proceso de secado el líquido se evapora y aparece al inicio del secado y en el interior de la madera un frente de evaporación; cuando este frente de evaporación llega a una célula de muy pequeña sección o de una puntuación, en razón de su pequeño diámetro las fuerzas de capilaridad son muy grandes. Estas repercuten por intermedio del agua líquida a las paredes celulares de la madera. Si localmente las fuerzas capilares son superiores a la resistencia mecánica de las paredes celulares, estas colapsan [11]

El colapso es una falla de resistencia de las paredes celulares y es reconocida por una ondulación en las caras de la madera. Si es importante, puede conllevar a rajaduras en el interior de la madera, pero esta no es sistemática, y solo aparece en presencia de agua líquida, es decir cuando la madera es aun muy húmeda.

Una temperatura elevada, favorece la aparición del colapso, puesto que ella produce una plasticidad de las paredes celulares. Por lo tanto, para limitar o impedir este defecto, es necesario de utilizar una temperatura baja y un alto contenido de humedad, en la medida en que esté presente el agua líquida, o sea hasta el punto de saturación de las fibras.

Cuando el colapso no está acompañado de rajaduras, se puede practicar un tratamiento para recuperar una parte del espesor. Esta operación consiste en pasar la madera, cuando su humedad está comprendida entre 15% a 20 %, a 100 °C a

pleno vapor saturado durante un tiempo que depende del espesor de la madera. Para una madera de 25 mm., de espesor, la duración es del orden de 2 horas. Nota; ciertas maderas son mas propicias al colapso que otras: Ejemplo; el Eucalipto y por lo general las maderas duras.

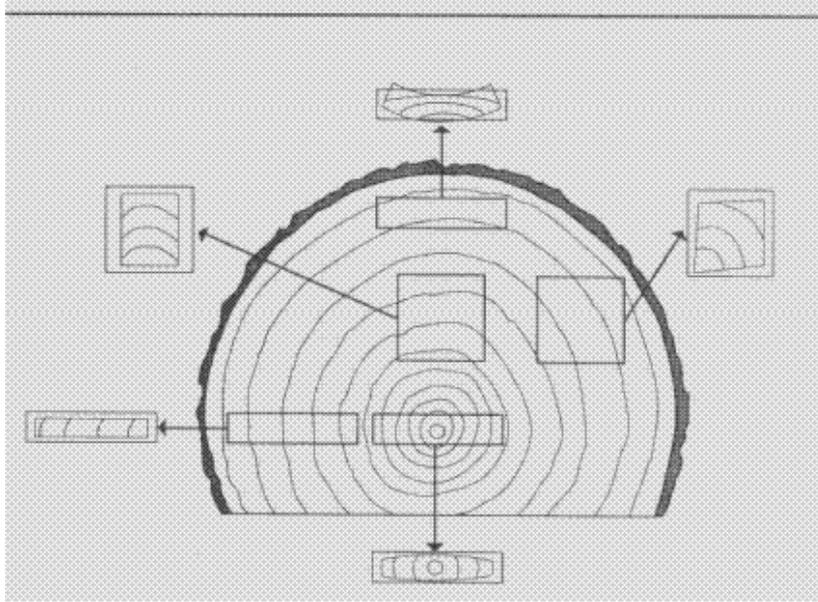
#### **3.2.2.5.2 Tensiones internas en el transcurso del secado**

En el transcurso del secado aparecen contracciones que son la consecuencia de las características de retractibilidad de la madera. El fenómeno de retractibilidad se produce por debajo del punto de saturación de las fibras. Las tensiones de secado pueden ser visualizados mediante probetas cortadas en forma de tenedor o peine.

#### **3.2.2.5.3 Rajaduras, deformaciones y daños debidos a un secado mal conducido**

##### **Deformaciones**

La retracción de la madera no es idéntica en las tres dimensiones. La retracción en la dirección tangencial es 1.5 a 2.5 veces mas importante que dentro la dirección radial. La retracción axial (longitudinal) es aproximadamente 50 veces menor que la retracción tangencial. A medida que la humedad de la madera disminuye, la sección de la madera aserrada se deforma.



**Figura 3.10** Tipos de deformaciones según la zona.

### **Rajaduras superficiales [12]**

Las rajaduras se producen dentro de zonas de menor resistencia mecánica, por lo tanto, las rajaduras resultan de la existencia dentro de la madera de un gradiente de humedad muy importante, donde la utilización de humedad relativa del aire muy baja antes de que las zonas internas de la maderazo hayan llegado al punto de saturación de las fibras.

Para evitar la aparición de las rajaduras de superficie, de extremos y el fenómeno de cementación hace falta utilizar un aire muy húmedo antes de que las zonas internas de madera hayan llegado al punto de saturación de las fibras.

## **Rajaduras internas**

Estas son debidas a la utilización, de un aire muy seco, que ha provocado un secado de las zonas periféricas bajo tensiones de tracción importantes.

En efecto, las rajaduras internas, se producen a partir del momento en donde toda la masa de madera ha pasado por debajo del punto de saturación de las fibras. Para evitar la aparición de las rajaduras internas, es necesario el aire muy húmedo hasta que las zonas internas de la madera hayan llegado al punto de saturación de las fibras.

### **3.2.2.5.4 Variación de coloración**

#### **Mancha azul**

Producido en la mayor parte de resinosos y de parte de especies tropicales, generalmente las denominadas “blancas”, y es producido por una infestación de hongos denominados “hongos cromógenos” ya estudiados anteriormente [13]

## **Manchado por separadores**

Luego del secado y en ciertas ocasiones, las huellas de los separadores es observado en una profundidad importante de las tablas; esto es debido a un estacionamiento prolongado de la humedad de la madera en la superficie de contacto entre el separador de apilado y la tabla.

Para evitar este inconveniente, hace falta:

- Utilizar separadores secos, con humedades inferiores a 15% de humedad.
- Para evitar la acumulación de humedad en los separadores, hay que utilizar separadores con sección en forma de “H” o “X” o acanaladuras.
- Utilizar separadores de madera o de otro material que no sea corrosible.

## **Decoloración.**

En ciertas especies, en el transcurso del secado presentan decoloraciones no homogéneas en toda la masa de la madera.

## Reducción de los defectos de secado

**Tabla 3.2** Reducción de los defectos de secado. [1]

<b>Defecto</b>	<b>Causa</b>	<b>Práctica recomendada</b>
Colapso	Temperatura elevada al inicio del secado	- Bajar la temperatura al inicio del secado y aumentar la humedad del aire.
Tensiones internas en el transcurso del secado	Las características de retractsibilidad de la madera	- Secado muy lento por debajo del punto de saturación de las fibras.
Deformaciones	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Separadores de madera emplazados incorrectamente.</li> <li>- Aire muy seco y equilibrio higroscópico de la madera muy reducida.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Camas de la pilas de madera, con separadores uniformemente distribuidos y espaciados y a partir de los extremos de la pila.</li> <li>- Aumentar la humedad relativa del aire.</li> <li>- Aumentar el equilibrio higroscópico de la madera.</li> </ul>
Rajaduras en extremos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aire muy seco y equilibrio higroscópico de la madera muy reducida.</li> <li>- Separadores de madera emplazados incorrectamente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumentar la humedad relativa del aire.</li> <li>- Aumentar el equilibrio higroscópico de la madera.</li> <li>- Camas de la pilas de madera, con separadores uniformemente distribuidos y espaciados y a partir de los extremos de la pila.</li> </ul>
Rajaduras de superficie e internos	Aire muy seco y equilibrio higroscópico de la madera muy reducida.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumentar la humedad relativa del aire.</li> <li>- Aumentar el equilibrio higroscópico de la madera.</li> </ul>
Mancha Azul	Temperaturas de secado y humedades del ambiente muy bajas.	- Las especies susceptibles deben ser protegidos con producto preservante de madera.
Decoloración	Temperaturas muy elevadas al inicio del proceso de secado	- Bajar la temperatura al inicio del proceso de secado.

## Calidad de secado

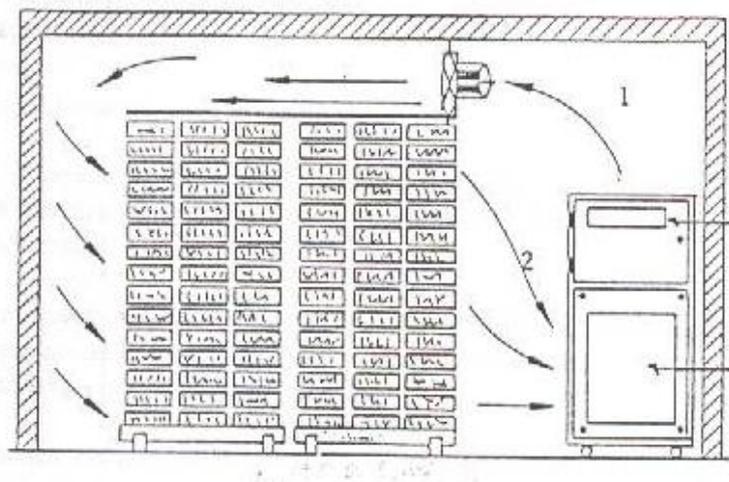
**Tabla 3.3** Calidad en el secado. [1]

Una buena calidad	Selección de calidad de la madera a ser secada;
Apilado cuidadoso.	Separadores de madera: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Con espesor uniforme.</li> <li>- Con espaciamiento uniforme.</li> <li>- De alineamiento estricto.</li> <li>- De especies duras y de color neutro.</li> <li>- Con humedades hasta el 12%</li> </ul>
Madera aserrada homogénea.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tablas del mismo espesor o muy similares.</li> <li>- Misma especie.</li> <li>- En lo posible, misma humedad inicial.</li> <li>- En lo posible tablas del mismo tipo de corte.</li> <li>- Menor inclinación del grano.</li> </ul>
Carguío cuidadoso de la cámara de secado.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Llenado homogéneo de las pilas de madera, evitando espacios abiertos que facilitaría el paso del aire evitando el paso por las pilas de madera.</li> <li>- Tapar espacios vacíos para forzar al aire a pasar solo por las pilas de madera.</li> </ul>
Capacitación apropiada del operador.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Conocimientos de los principios de base del secado.</li> <li>- Conocimiento del proceso productivo.</li> <li>- Conocimiento del equipo de secado.</li> <li>- Conocimiento y reacción ante los avisos y dispositivos de seguridad.</li> <li>- Previsión de imprevistos y accidentes</li> </ul>
Programa de secado.	Selección de una tabla de secado adecuada.
Seguimiento diario del ciclo de secado.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Registro de los datos de se secado.</li> <li>- Conducción, control y vigilancia.</li> </ul>
Dimensionamiento apropiado de equipos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Poder calorífico.</li> <li>- Velocidad del aire.</li> <li>- Aspersión de humedad.</li> <li>- Dispositivos de homogenización del clima interior.</li> <li>- Dispositivos de control</li> </ul>
Bienestar del personal	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Horario de trabajo.</li> <li>- Jornales justos.</li> <li>- Servicios varios.</li> <li>- Vacaciones.</li> <li>- Salud.</li> </ul>

### 3.3 Tipos de Secadores [9], [14]

Las formas más empleadas de secado artificial son: condensación, convección, solar, radio frecuencia, y al vacío. Cada sistema tiene sus ventajas y desventajas, y se debe individualmente para cada empresa al sistema más aconsejable.

#### 3.3.1 El sistema de condensación.



**Figura 3.11** Sistema de condensación.

El centro de este sistema es un aparato de refrigeración de aire. El principio es, que el aire reduce su capacidad de absorción de agua y debido a esta circunstancia, el exceso de agua evaporada empieza a condensarse y sale en forma líquida del refrigerador hacia el exterior de la cámara de secado. De esta manera se mantiene la capacidad de absorción de aire, caso contrario, el aire se saturaría con el agua que contiene la madera y se terminaría la funcionalidad como medio de secado. La temperatura de secado es de 35 a 45°C, la cual es

relativamente baja, y no se requiere por consecuencia de costos de sistemas de calefacción con respecto a su adquisición.

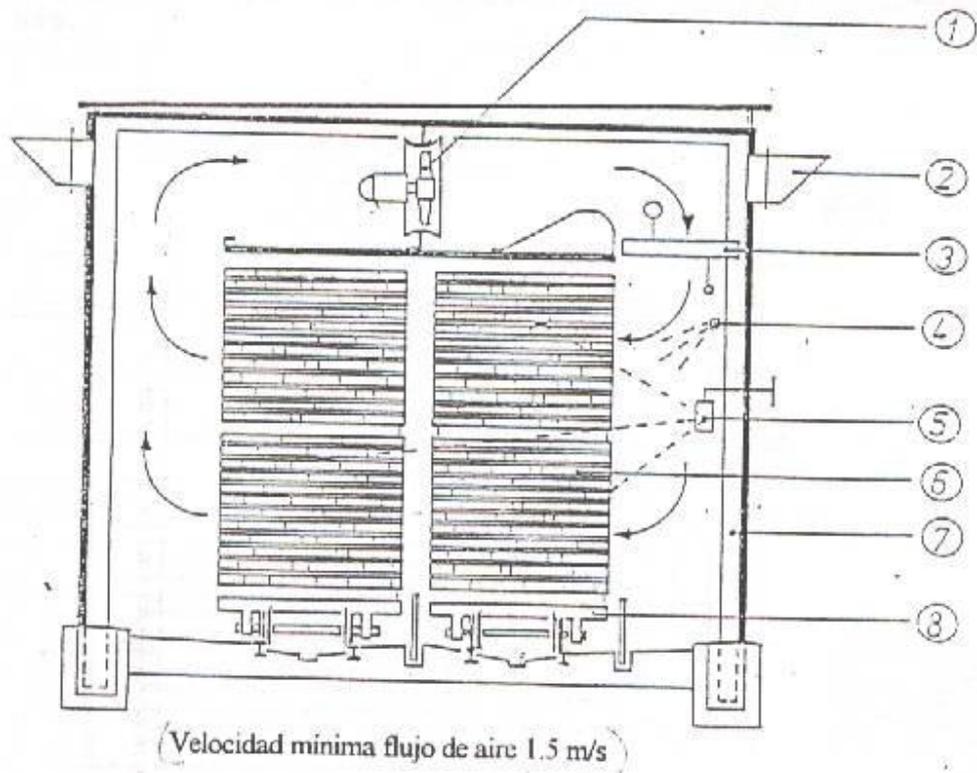
Las principales desventajas de este sistema son:

- El secado se realiza lentamente, de 1 a 2 meses.
- Es difícil y muy costoso bajar el contenido de humedad de la madera a menos de 14%
- Tiene un alto consumo de energía eléctrica.

### **3.3.2 Sistema de convección.**

La forma más aconsejable hoy en día para la mayoría de las empresas es la del secado artificial según el sistema de convección. En este caso se intercambia el aire saturado de agua con aire fresco. Para eso, todos los secadores de este tipo tienen orificios con tapas, para la salida del aire húmedo o la entrada de aire seco. Estos secadores trabajan con temperaturas más elevadas normalmente de 60 a 90 °C. Generalmente tienen instalado intercambiadores de calor alimentados por: agua caliente, aceite térmico, vapor, gases de combustión. Para la generación de energía calorífica, todavía en muchos secadores se utiliza quemadores a diesel, siendo más económica la utilización de los desperdicios propios de madera, en caso de contar con ellos.

El secadero por convección consta de las siguientes partes o elementos:



**Figura 3.12** Sistema de convección.

1. Ventilador.
2. Ventilas regulables para intercambio de aire.
3. Intercambiador de calor.
4. Sistema de humectación.
5. Sistema de mando y control.
6. Madera a secarse.
7. Cámara de secado.
8. Coches de alimentación.

### **3.3.2.1 Principio de funcionamiento. [7]**

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

Cuentan con una caldera de madera o carbón, que calienta el agua de 90 °C a 150 °C, para luego hacer pasar el líquido por unos intercambiadores de calor o radiadores (serpentes) instalados en el interior del horno, en donde también se instalan ventiladores de gran capacidad que generan una fuerte corriente de aire caliente, gracias al paso de éste por los radiadores.

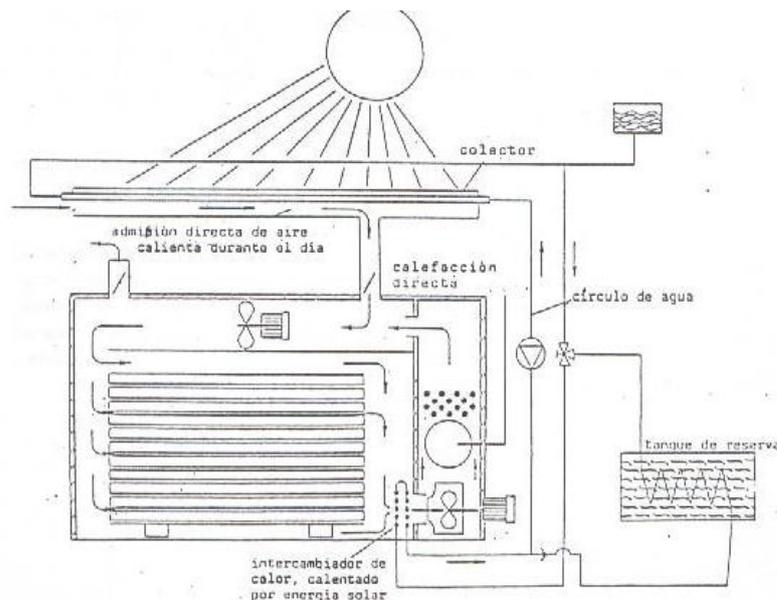
Además, están provistos de unas boquillas de aspersion de vapor usadas para humectar o aumentar la humedad relativa de la cámara, y unas chimeneas o ventilas ubicadas en ambos extremos del horno que pueden ser abiertas o cerradas para controlar, tanto la humedad como la temperatura y que además sacan el aire “mojado” e introducen aire renovado. En algunas cámaras la humectación se logra con vapor de agua que cumple doble función: calentar y humedecer el ambiente.

En cuanto a los sistemas para medir condiciones como la temperatura y la humedad, existen una gran variedad, desde los más sencillos como el bulbo seco y el bulbo húmedo hasta los más sofisticados sensores electrónicos de manejo automatizado, pero todos tienen como base el mismo principio: el equilibrio de la madera a unas condiciones ambientales, o sea el C.H.E.

Vale señalar que para su calentamiento, algunas cámaras de éste tipo utilizan distintos sistemas como aceite térmico, quemadores de gas o calderas de fuego directo, que son éstas últimas, las menos usuales y a la vez, las más peligrosas.

### 3.3.3 Secaderos de energía solar

El uso de la energía solar para el secado de la madera, constituye una alternativa ecológica para la generación de la energía térmica requerida. El costo de estos tipos de secaderos, en caso de aplicar los mismos parámetros técnicos supera los al de los antes mencionados tipos, debido al alto costo de la paneles solares.



**Figura 3.13** Secadero con energía solar.

### **3.3.3.1 Principio de funcionamiento**

Funcionan aprovechando la energía calorífica del sol y la luz para ganar temperatura. En este grupo el mercado ofrece diversos tipos con varios grados de tecnificación (sensores de temperatura y humedad) y tamaños. La principal ventaja de estos sistemas es el menor consumo energético y el respeto por el medio ambiente. Sus desventajas: el proceso de secado se desarrolla más lentamente que usando cámaras convencionales o deshumidificadoras. Estas funcionan también controlando la temperatura y la humedad y empleando ventiladores para forzar las corrientes de aire tal como sucede con las cámaras convencionales.

### **3.3.4 Secaderos al vacío [9]**

El secado al vacío es una alternativa para el uso de carpinterías pequeñas de bajo consumo madera sólida. El costo de adquisición de estos equipos son muy superior a las demás alternativas antes mencionadas. Generalmente son secaderos tubulares de acero, con cierre hermético, que permiten la generación de un vacío en su interior. En el secador al vacío se aprovecha dos características físicas para mejorar el transporte del agua en la madera hacia la superficie y su evaporación y son:

- Al bajar la presión atmosférica se reduce la temperatura de ebullición del agua.
- Al bajar la presión se reduce la resistencia del agua al pasar por la madera.

Esto acelera notablemente el proceso de secado del agua en la madera. El proceso de secado se realiza de 4 a 5 veces más rápido que en los secadores tradicionales. Otra ventaja de este sistema es la mejor calidad del secado de

maderas difíciles de secar, en comparación con otros sistemas de secado. La calefacción de la madera a secar, se realiza generalmente mediante planchas de aluminio con calentamiento mediante agua o vapor. En caso de calentar la madera mediante aire caliente, el proceso de secado al vacío se realiza de forma cíclica.

El aire calienta la madera que es apilada normalmente sobre los coches de alimentación, en esta fase la madera no es seca, sino que solamente se calienta a su temperatura de secado y es preparada para la segunda fase. En esta se conecta la bomba de vacío succionando el aire húmedo de la cámara y generando debido a la temperatura inferior de ebullición del agua en presiones bajas, un enfriamiento de la superficie de la madera.

En el interior de la madera se encuentra en este momento mayor temperatura que en la superficie lo que causa que la humedad camine igualmente con el calor hacia la superficie, evaporándose allí con mayor facilidad por la reducida presión atmosférica. Este proceso se repite continuamente hasta lograr la humedad final de la madera. El tiempo de secado alcanza de un 50 % a un 20 % del tiempo de secado de un secadero de convección.



**Figura 3.14** Secadero de vacío.

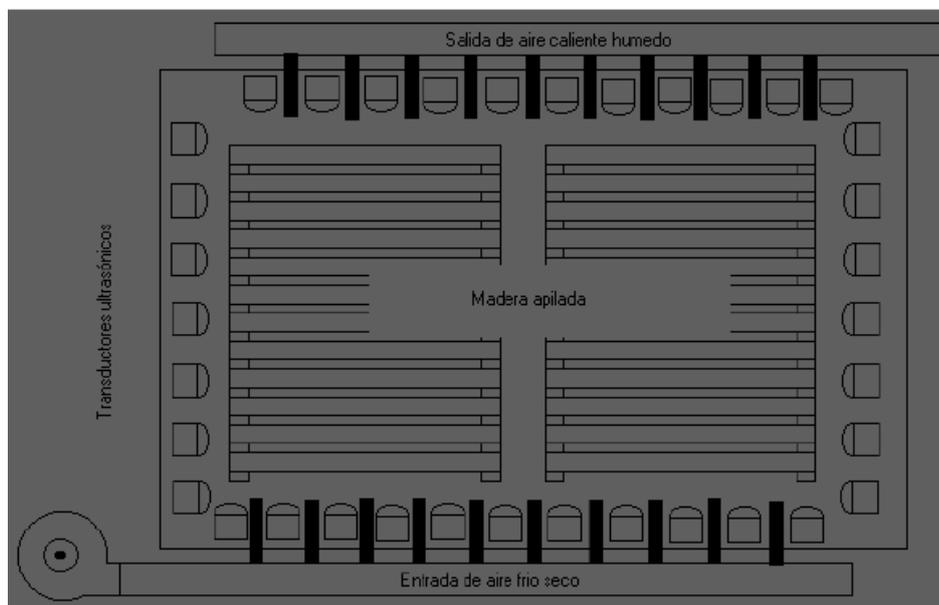
#### **3.3.4.1 Principio de funcionamiento.**

Parten de un principio de funcionamiento distinto a las anteriormente citadas, y que se resume en dos pasos aplicados consecutivamente hasta alcanzar la humedad deseada: primero, se aplica temperatura a la madera “inyectándola” a presión, para abrir el poro, luego se aplica el vacío succionando la humedad.

Estas cámaras que, generalmente se utilizan en cargas de madera relativamente pequeñas (no sobrepasan el metro cúbico aunque también las hay de mayor tamaño) y tienen un alto costo en el mercado. Su mayor ventaja es la reducción de tiempo en el proceso comparado con otros sistemas y que además garantizan la calidad de la madera, sin sufrir alteraciones.

### 3.3.5 Secadores por radio frecuencia.

Ideales también para cargas pequeñas, éstas operan totalmente diferente a todas las anteriores gracias a que el principio de la radio frecuencia es casi exactamente como el de un horno microondas: las células con agua son obligadas a vibrar con alta frecuencia, para generar un calentamiento de las células que evapore el agua. Gracias a este sistema se obtienen tiempos de secado verdaderamente rápidos, sin embargo, tanto el consumo de energía (único medio para su funcionamiento) como el costo de los equipos es muy alto. [15]



**Figura 3.15** Secadero por radiofrecuencia

### **3.4 Parámetros del secado.**

#### **3.4.1 Bases tecnológicas para el secado de la madera [14], [9]**

##### **3.4.1.1 La humedad de la madera.**

La propiedad de absorber agua en el interior de la madera se explica sobre todo por dos razones:

1. La madera es un material poroso con cierta parte de volumen de aire que puede llenarse con agua.
2. La celulosa, sustancia primaria de la madera, se une con moléculas de agua, aumentando al mismo tiempo su volumen.

El agua llega a la madera inicialmente por medio de la sabia, constituyendo el medio de transporte de las sustancias de alimentación del árbol. Una vez secada la madera, esta se humidifica por tener contacto directo con el agua o por juntarse la celulosa con el agua contenida en la atmósfera. Esta propiedad de la madera de adaptar su contenido de humedad al medio ambiente, se denomina higroscopicidad. La cantidad máxima de absorción de agua depende por ende de su masa celular y del volumen de poros que contiene.

El contenido de humedad y su distribución en la partida de madera determinan la conducción del programa de secado. Esta influencia es más patente

cuando la partida a secar está formada por tablas con contenidos de humedad muy desiguales (madera recién aserrada y madera oreada), reduciendo su importancia cuando la partida de madera es más homogénea. [14].

El secado de madera con diferencias importantes en el contenido de humedad inicial de las tablas (humedades comprendidas entre el 40 y el 80 %) dificulta la adecuación de las condiciones de secado para toda la partida. Condiciones adecuadas para contenidos de humedad bajos, someterían a las tablas más húmedas a condiciones mucho más severas, aumentando el riesgo de presencia de defectos. Por otra parte, al realizar el secado partiendo de madera con contenidos de humedad muy dispares, se obliga a alargar las fases de homogeneizado final, reduciendo la rentabilidad del secado. El agua en la madera se encuentra bajo diferentes formas tal como se describe a continuación.

**TABLA 3.4** Contenido de humedad de la madera. [16]

<b>ESPECIE</b>	<b>HUMEDAD INICIAL(Ho) Estado verde de la madera (%)</b>	<b>HUMEDAD FINAL(Hf) (%)</b>
<b>Mascarey</b>	<b>84.8</b>	<b>12</b>
<b>Eucalipto</b>	<b>111.6</b>	<b>12</b>
<b>Chanul</b>	<b>68.3</b>	<b>12</b>
<b>Guayacán</b>	<b>60.9</b>	<b>12</b>

#### **3.4.1.2 Evolución del contenido de humedad en el secado de madera**

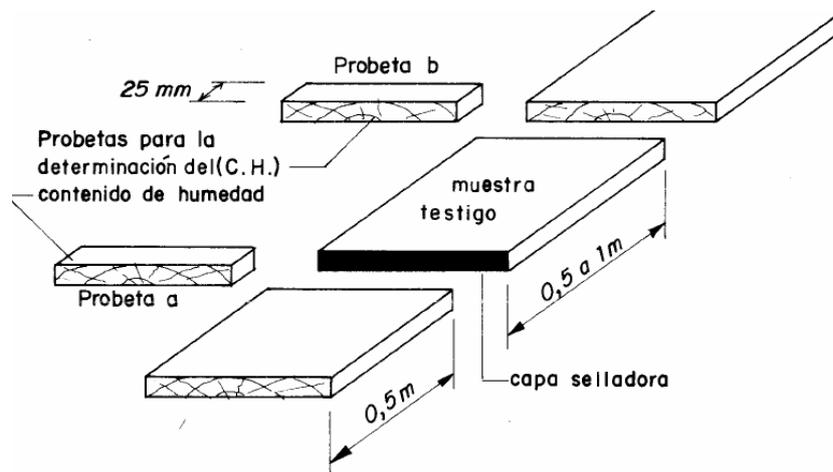
El contenido de humedad (CH) se define como el peso de la cantidad de agua presente en la madera, expresado en función del peso totalmente seco

(anhidro); corresponde a una madera en la cual se ha eliminado el agua libre y de impregnación mediante el secado a temperaturas comprendidas entre 100-105 °C hasta alcanzar peso constante después de dos pesadas consecutivas. El contenido de humedad en la madera se expresa en porcentaje y se calcula por la ecuación (Referencia [9] página 1-9):

$$CH = \frac{PH - PS}{PS} \times 100 \quad (3.1)$$

Donde:

- |    |                                   |     |
|----|-----------------------------------|-----|
| CH | Contenido de humedad de la madera | [%] |
| PH | Peso húmedo                       |     |
| PS | Peso seco                         |     |



**Figura 3.16** Parámetros para selección de probetas.

### 3.4.1.3 Peso de la madera. [16]

#### 3.4.1.3.1 Peso específico aparente

Al hablar de peso específico en la madera se debe tener en cuenta que es un material poroso que contiene aire en su interior, de modo que debe distinguirse entre peso específico anhidro de la madera y el peso específico aparente. El peso específico aparente toma en consideración el peso de la madera sólida y el volumen que ocupa, ambos valores deben ser medidos en condiciones anhidra para que la humedad no influya. El peso específico aparente toma en consideración el peso de la madera con poros en condición anhidra y el volumen de la madera anhidra al 10 % de humedad. En la tabla II se da el peso específico anhidro de ciertas especies forestales ecuatorianas.

**TABLA 3.5** Peso específico de la madera húmeda. [4]

<b>ESPECIE</b>	<b>Peso específico</b> $(\frac{gr}{cm^3})$
<b>LAUREL</b>	<b>0.45</b>
<b>CHANUL</b>	<b>0.75</b>
<b>GUAYACAN</b>	<b>0.86</b>
<b>EUCALIPTO</b>	<b>0.72</b>

### 3.4.1.3.2 Peso específico húmedo de la madera.

En la técnica, frecuentemente se necesita el peso específico de la madera en estado verde. En el caso de madera con un contenido de humedad entre el 0 % y 30 %, se recomienda utilizar la siguiente ecuación:

$$\gamma_h = \frac{\gamma_o(1+H)}{1+(0,84\gamma_o H)} \quad (3.2)$$

Donde:

$\gamma_h$	Peso específico húmedo de la madera	$[\frac{gr}{cm^3}]$
$\gamma_o$	Peso específico anhidro de la madera	$[\frac{gr}{cm^3}]$
H	Humedad anhidra de la madera.	

En caso de madera con un contenido de humedad superior a su punto de saturación de las fibras, es decir mayor que el 30%, se recomienda la siguiente ecuación:

$$\gamma_h = \frac{\gamma_s(1+H_o)}{1+(0.28\gamma_s)} \quad (3.3)$$

Donde:

$\gamma_h$	Peso específico húmedo de la madera	$[\frac{gr}{cm^3}]$
------------	-------------------------------------	---------------------

$\gamma_s$	Peso específico aparente de la madera	$[\frac{gr}{cm^3}]$
$H_0$	Humedad inicial de la madera.	

### **3.4.2 Bases físicas para el secado de la madera.**

#### **3.4.2.1 Temperatura [7]**

El calor es la fuente de la que las moléculas de agua en la madera adquieren la energía cinética necesaria para su evaporación, la cual depende de la cantidad de energía suministrada.

Cuanto más elevada sea la temperatura del ambiente que rodea la madera, más intensa será la evaporación puesto que el aire podrá absorber más la humedad. Hacia el interior de la pieza de madera, la temperatura también condiciona la velocidad del movimiento del agua, aumentando el coeficiente de circulación con un incremento de la temperatura. Así, a 80 °C. La velocidad del movimiento del agua interior de la madera es aproximadamente cinco veces mayor que a 25 °C. Es importante también tener en cuenta que la temperatura, conjuntamente con la humedad relativa, son los elementos que determinan el clima dentro de una cámara de secado y el equilibrio del contenido de humedad de la madera.

### 3.4.2.2 Presión del vapor saturado [16]

La presión de vapor determina el movimiento de la humedad y por tanto, la velocidad de secado de la madera.

La presión, para una temperatura dada, en la que la fase líquida y el vapor se encuentran en equilibrio dinámico; su valor es independiente de las cantidades de líquido y vapor presentes mientras existan ambas.

Este fenómeno también lo presentan los sólidos; cuando un sólido pasa al estado gaseoso sin pasar por el estado líquido (proceso denominado sublimación o el proceso inverso llamado sublimación inversa) también se produce una presión de vapor. En la situación de equilibrio, las fases reciben la denominación de líquido saturado y vapor saturado.

Esta propiedad posee una relación inversamente proporcional con las fuerzas de atracción intermoleculares, debido a que cuanto mayor sea el módulo de las mismas, mayor deberá ser la cantidad de energía entregada (ya sea en forma de calor u otra manifestación) para vencerlas y producir el cambio de estado.

De acuerdo con la ley de Dalton, la presión atmosférica puede considerarse como la sumatoria de las presiones parciales del aire seco y del vapor de agua, utilizando la siguiente ecuación:

$$P = P_v + P_a \quad (3.4)$$

Donde:

P	Presión atmosférica	[bar]
Pv	Presión parcial de vapor	[bar]
Pa	Presión parcial del aire seco	[bar]

### **3.4.2.3 Presión parcial [17]**

El aire es una mezcla de gases, cada uno de estos gases contribuye al peso de éste y a su vez cada uno ejerce una presión parcial; la sumatoria de estas presiones parciales es la presión total de esta mezcla de gases. Por tanto cuando se habla de la presión parcial de vapor del aire, se refiere a la presión ejercida sobre la superficie de la tierra hasta los límites de la atmósfera. La cantidad de vapor de agua presente en el aire puede variar entre límites muy amplios y consecuentemente la presión parcial, a una temperatura dada, puede variar desde cero en aire seco, hasta la presión de vapor de agua en aire saturado o sea temperatura.

### **3.4.2.4 Humedad relativa [10]**

La humedad relativa se define como la relación entre la presión parcial del vapor de agua presente en el aire y la presión de vapor saturado a la misma temperatura, expresada en porcentaje. En otras palabras la humedad relativa del aire seco es la relación entre la cantidad de agua contenida en un volumen

determinado de aire y la mayor cantidad posible de vapor de agua que pueda hallarse en ese volumen de aire a la misma temperatura. Matemáticamente se expresa por la siguiente ecuación:

$$\phi = \frac{P_v}{P_g} \times 100 \quad (3.5)$$

Donde:

$\phi$	Humedad relativa.	[%]
$P_v$	Presión real de vapor.	[bar]
$P_g$	Presión de saturación del vapor.	[bar]

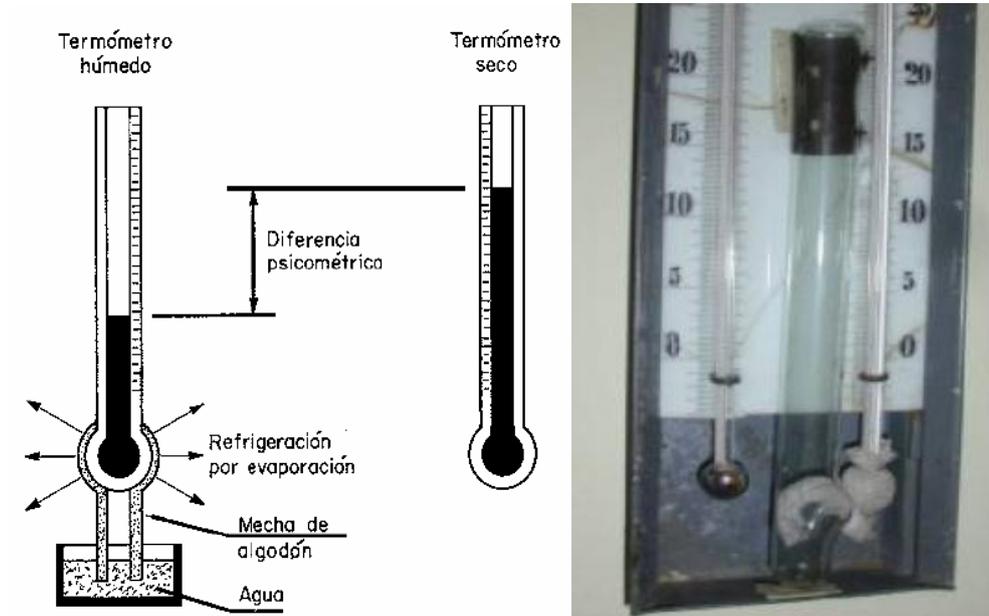
Existen varias formas para medir la humedad relativa del aire entre ellas:

#### **3.4.2.4.1 Psicómetro [11]**

Consta de dos termómetros, en uno de los cuales el bulbo permanece siempre seco e indica la temperatura real del aire y el otro llamado termómetro de bulbo húmedo, mantiene su parte sensitiva cubierta por una tela de algodón húmeda.

El agua que conserva húmeda esta se mantiene en un nivel constante en un recipiente colocado debajo. La temperatura del termómetro húmedo será menor que la del termómetro seco debido a que aquel sufre un enfriamiento como consecuencia de la evaporación de parte del agua de la tela húmeda. El agua que conserva húmeda la tela, se mantiene en un nivel constante en un recipiente colocado debajo. Debe tenerse en cuenta que, para una indicación correcta de la

humedad relativa, es indispensable que el aire que enfría la tela del bulbo húmedo circule a una velocidad de 2 m/seg.



**Figura3.17** Psicómetro.

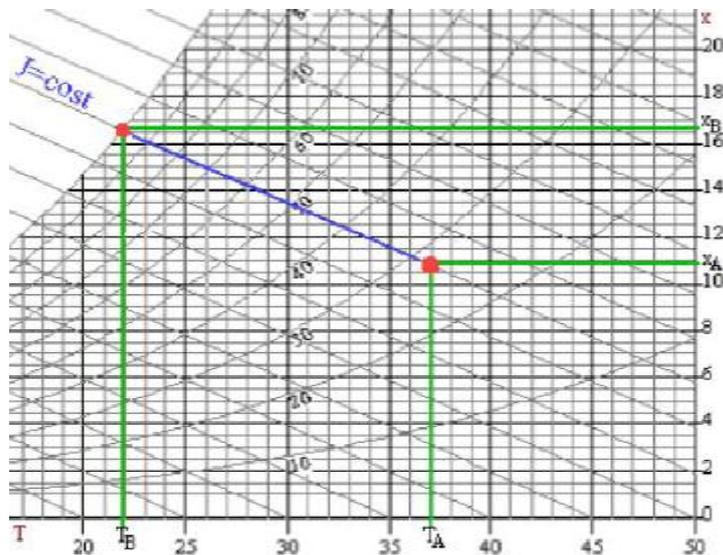
#### 3.4.2.4.2 Higrómetro.



**Figura 3.18** Higrómetro

Bajo condiciones normales y para temperaturas inferiores a 80°C la humedad relativa del aire se mide con el higrómetro. Este aparato se basa en la propiedad que tienen ciertas materias como el cabello, de elongarse cuando el aire está húmedo y de contraerse cuando el aire está seco. La elongación o contracción del cabello se transmite mediante un sistema de palancas, a una aguja que indicará en un dial la humedad del aire circundante. [9]

### 3.4.2.4.3 Carta psicométrica.



**Figura 3.19** Carta psicométrica

Las cartas muestran gráficamente todos los valores característicos de la mezcla aire-vapor de agua. La información presentada en estas cartas psicométricas es variable. En éstas se representa las relaciones entre las temperaturas de bulbo húmedo, bulbo seco y punto de rocío, la humedad relativa

del aire, el volumen específico de la muestra aire-vapor de agua, el contenido de humedad del aire y el calor totalmente almacenado por la mezcla aire-vapor de agua (entalpía del aire húmedo). [9]

#### **3.4.2.5 Velocidad del aire [8]**

La circulación del aire es otro de los elementos de control de la velocidad de evaporación del agua durante el proceso de secado de la madera. La velocidad del aire tiene las siguientes funciones:

- Transmitir la energía requerida para calentar el agua contenida en la madera, facilitando su evaporación.
- Transportar la humedad saliente de la madera.

Una corriente de aire 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. Cuando menor sea la capa límite entre la madera y el aire, más rápida será la remoción de la humedad de la superficie de la madera.

A mayor velocidad del aire, mayor es la tasa de evaporación y menor el tiempo de secado, la circulación del aire debe ser fuerte y regular. La velocidad óptima del aire es de 2 m/seg, a mayores velocidades sin un debido control se produce un gradiente de humedad alto entre la superficie y el interior de la madera.

### 3.4.2.6 El equilibrio higroscópico.

**Tabla 3.6** Relación de humedades [17]

<b>HUMEDAD RELATIVA</b>  <b>(%)</b>	<b>HUMEDAD DE LA MADERA</b>  <b>Equilibrio higroscópico</b>  <b>(%)</b>
<b>100</b>	<b>28.3</b>
<b>90</b>	<b>20.2</b>
<b>80</b>	<b>16.3</b>
<b>70</b>	<b>13</b>
<b>60</b>	<b>10.5</b>
<b>50</b>	<b>9</b>
<b>40</b>	<b>7.6</b>
<b>30</b>	<b>5.9</b>
<b>20</b>	<b>4.3</b>

En caso de un clima variable (temperatura, humedad relativa) cambia la madera continuamente su contenido de humedad. La madera seca absorbe en un clima húmedo, y la madera húmeda entrega humedad en un clima seco. En los dos casos la madera y el clima llegan después de un tiempo al llamado equilibrio higroscópico.

En este estado la madera no absorbe ni entrega vapor de agua. En la práctica por causa de las permanentes variaciones climáticas, el equilibrio higroscópico absoluto nunca se obtiene.

Es por esto que la madera bien seca se adapta de forma permanente en cuanto a su contenido de humedad, al clima que la rodea. Los factores determinantes del equilibrio higroscópico son: la humedad relativa y la temperatura. En realidad el equilibrio higroscópico en un clima determinante, no es igual para todas las maderas; las maderas se igualan con diferencias de hasta más o menos 3 %, bajo las mismas circunstancias climáticas, con una supuesta temperatura de 20 °C., la madera ajusta su contenido de humedad en dependencia a la humedad relativa, con los siguientes valores:

Para el equilibrio higroscópico la humedad relativa es mucho más significativa que la temperatura. La humedad relativa refleja el grado de saturación de aire con agua.

### **3.5 Necesidad de un secador de madera**

Se tendrá en cuenta la optimización del uso de la energía requerida para el proceso de secado de la madera, toda vez que se pretende optimizar costos de producción, así como evitar la contaminación ambiental mediante el arrojado de desperdicios de biomasa y gases de combustión.

Puesto que en la actualidad lo que más nos preocupa es la conservación del medio ambiente se realizará estudios que guíen el manejo de una tecnología limpia en la combustión necesaria para el proceso de secado.

La tendencia en el sector maderero es el de crecimiento es así que con este trabajo investigativo buscamos innovar obteniendo mayor eficiencia en el secado de madera y lo más importante dejar la dependencia de tecnologías extranjeras.

Finalmente es evidente la necesidad de un sistema de secado de madera, evitando demoras innecesarias en el proceso de producción por no tener una cámara de secado y así obtener un producto final de calidad y costos convenientes.

### **3.6 Alternativas del tipo de secador.**

Los tipos de secador que se pueden utilizar para este proyecto son muy variados. El objetivo de un secador de madera es acelerar el secado del producto y estabilizarlo a la humedad deseada en este caso al 12% de humedad, para luego encontrar un equilibrio higroscópico con el medio ambiente. El sistema de condensación requiere de sistemas de calefacción y refrigeración los mismos que funcionan con suministro eléctrico. Además el tiempo de secado es en períodos largos. Al funcionar con electricidad resulta demasiado caro obtener humedades inferiores al 14 %.

Los secaderos de energía solar brindan una solución ecológica ante la necesidad de secar la madera pero de igual manera también funcionan con sistemas alternativos de combustible, su costo es elevado por los paneles solares.

Los secaderos al vacío brindan un secado de buena calidad pero de igual manera su costo por equipos es alto y la capacidad de secado es pequeño. Su uso está enfocado principalmente para carpinterías y talleres pequeños.

Las cámaras de secado convectivo utilizadas por la mayoría de las empresas son los más utilizados conjuntamente con el secado natural, de igual manera puede utilizar dos sistemas de generación de calor.

El secado por radio frecuencia por asimilarse con un horno de micro ondas resulta costoso producir un secado y es estrictamente para capacidades pequeñas.

### **3.7 Selección de la alternativa**

Después de analizar las diferentes alternativas sobre el tipo de secador, se concluye que la opción más viable para la realización del presente proyecto, es utilizar un secador tipo convectivo y considerándose como mejor alternativa para la generación de calor la utilización de los propios desechos resultado de la producción de parquet.

## CAPÍTULO IV

### 4. DISEÑO DEL SISTEMA

#### 4.1 Determinación de parámetros de diseño del sistema.

##### 4.1.1 Parámetros Físicos.

Varios son los factores físicos a tomarse en cuenta para el diseño de la cámara de secado de madera. Uno de los parámetros más importantes y punto de partida es el dimensionamiento de la cámara de secado. Una longitud correcta y un ancho adecuado de la cámara de secado son base fundamental para obtener un secado de calidad. El ancho de la cámara se ha dimensionado en función del número de pilas de madera a secar es decir de la capacidad nominal. [18]

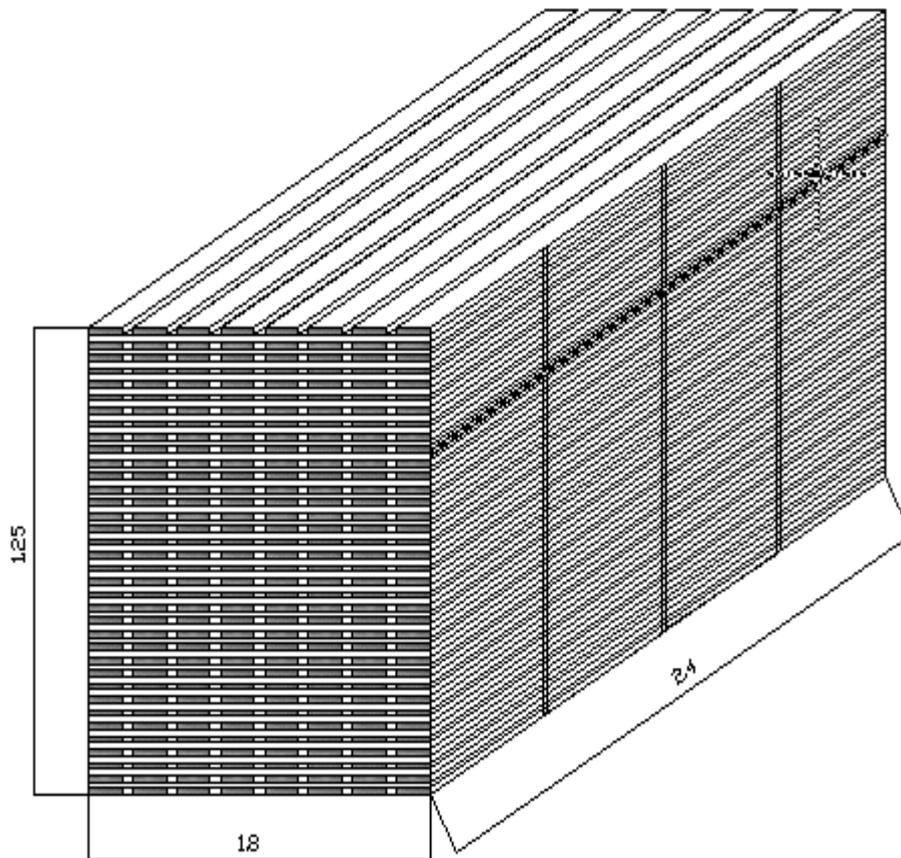
##### 4.1.1.1 Dimensionamiento de la cámara de secado.

En la empresa Parquet “Los Pinos” los denominados tablones a tratar tienen las siguientes dimensiones:

**Tabla 4.1** Dimensiones de los tablones a secar

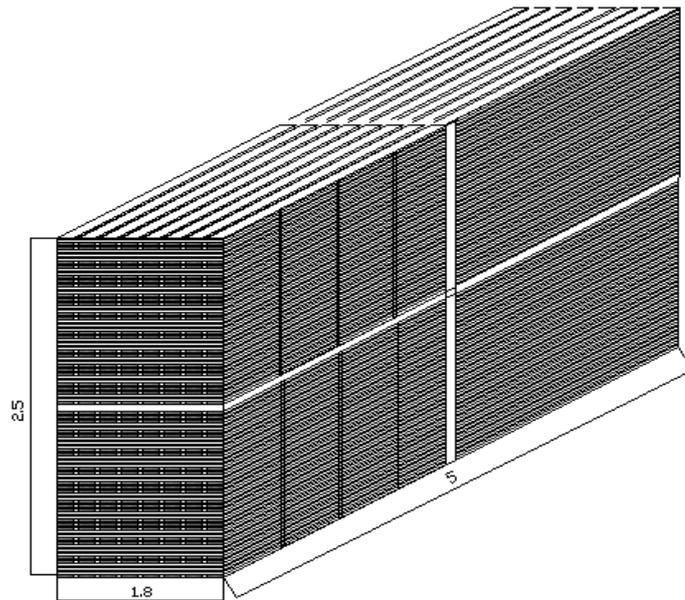
Largo	2.4 m
Ancho	0.15m
Espesor	0.025m

De tal manera que el conjunto de tablones forman pilas de las siguientes dimensiones:



**Figura 4.1** Dimensiones de la pila de madera.

Se recomienda para un buen flujo de aire a través de las pilas dejar una separación de 0.6 a 1.4 metros entre las pilas y las paredes de la cámara, teniendo en cuenta que en el techo debe existir suficiente espacio para la instalación de los ventiladores. [18]



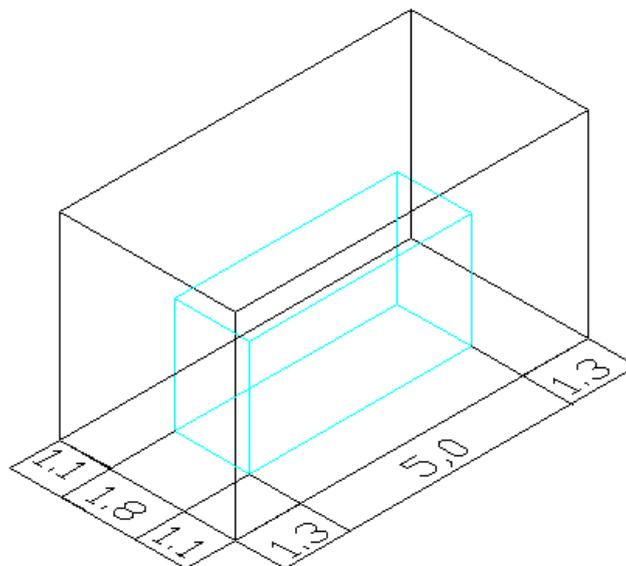
**Figura 4.2** Conjunto de pilas en el interior de la cámara de secado

En base a lo anterior, la cámara de secado tiene las siguientes dimensiones:

Profundidad: 4 m.

Largo: 7.6 m.

Altura: 4.3 m



**Figura 4.3** Separación entre las pilas de madera y las paredes de la cámara.

Cabe recalcar que las dimensiones son interiores.

### **Características de la cámara de secado.**

- **Estructura**, depende básicamente de los requerimientos de cada empresa, en este caso se realizará el diseño en aluminio estructural, ya que el proceso de secado es altamente corrosivo además de la facilidad que presenta al realizar el montaje o traslado de la cámara de un lugar a otro sin sufrir daños. Teniendo presente que además presenta ventajas por su resistencia al fuego en caso de un incendio y de ser encontrado fácilmente en el mercado local.
- **Paredes y techo**, son de paneles modulares, los que cubrirán la estructura y estarán unidos entre sí mediante pernos, con este tipo de paneles se puede armar o retirar una pared con facilidad en muy corto tiempo, además del costo con relación a otros materiales de construcción.



**Figura 4.4** Cámaras de secado.

#### **4.1.2 Parámetros térmicos.**

##### **➤ Sistema de calefacción,**

Este debe ser capaz de calentar la madera, las paredes de la celda y suministrar el calor necesario para evaporar la humedad de la madera al nivel deseado. Así pues, es muy importante contar con un sistema que posea la capacidad de nivelar el ambiente a tiempo y no ocasione un daño irreparable en la madera. Las cámaras que operan con calentamiento directo, en las cuáles se aplica el calor de una llama a una gran masa de hierro o similar, para que caliente el aire que abraza la madera. En caso contrario, la ausencia de tal masa en un esquema similar produce el corte inmediato de calor, descendiendo drásticamente la temperatura para elevarse nuevamente al encender la llama, lo que ocasiona el riesgo de colapso en la madera por los valores extremos de temperatura que se manejan. Para evitar dicho colapso se requiere entonces de una gran capacidad de intercambio de calor con aire, lo que implica en este caso el uso de un radiador. Para su funcionamiento un fluido corre por su interior a una temperatura lo más constante posible, calentándolo, mientras es controlado o interrumpido fácilmente por el operador o por el control programador. El clima creado dentro de la cámara permite el secado progresivo de la madera hasta el contenido de humedad final deseado. Para dar calor a estas cámaras se utilizan diferentes fuentes térmicas, siendo las más comunes el vapor de agua, el agua caliente y el aceite térmico. Estos diferentes fluidos se consiguen a través de calderas de calefacción industrial que utilizan como combustible derivados del petróleo, gas natural o el más recomendado para estos procesos debido a su escaso valor económico: el residuo de la madera,

aserrín, viruta, astilla y corteza. Otro sistema de calentamiento es el eléctrico que funciona por medio de unas resistencias aletadas encargadas de producir el calor que será transmitido a la madera. Las calderas son elementos externos al cuarto de secado y el vapor se transfiere a éste siempre, por medio de un intercambiador

Se concluye que se utilice calentamiento indirecto mediante un intercambiador de flujo cruzado, en el cual se utiliza vapor generado por una caldera a baja presión, con lo que se evita cambios bruscos de temperatura al interior de la cámara, lo que favorece la calidad del producto final por cuanto se evita deformaciones de tipo hinchazón y contracción.

➤ **Sistema de ventilación.**

Tiene como finalidad producir una circulación de aire apropiada a través de las pilas de madera y los intercambiadores de calor, además de remover los vapores húmedos acumulados en la celda. De acuerdo al diseño, estos pueden tener motores por medio de transmisores o acoples directos. En funcionamiento, el aire dentro de la cámara que se satura con la humedad de la madera debe ser reemplazado por aire fresco capaz de retener dicha humedad. Para ello, se usan ventilas que expulsan aire y lo renuevan aprovechando el torrente de baja y alta presión producido por ventiladores encargados de hacer circular el aire dentro de la cámara. Estos aparatos dotados de ventiladores axiales y compuertas, sincronizan su acción según el sentido de la circulación del aire dentro de la cámara, permitiendo que sea el aire saturado y no el recalentado el que se expulse,

mientras que el aire fresco ávido de humedad confluye con el aire caliente directamente sobre la madera logrando así el secado.[3]

Los ventiladores axiales o radiales generalmente están ubicados en la parte superior de las pilas de madera, por medio de la instalación de un techo falso en el interior de la cámara, sin embargo a la hora de realizar el respectivo mantenimiento este sistema no presta las mismas facilidades que presenta el sistema de ventilación lateral.

#### ➤ **Sistema de humectación**

La humedad al interior de la cámara se la controla inyectando vapor o abriendo ventilas, siendo este un factor muy importante para un exitoso proceso de secado. Este control se debe realizar de una manera continuada desde que se cierran las puertas de la cámara cargada de madera y la instalación tiene que estar en condiciones de responder en poco tiempo a las necesidades variables de humedad relativa del aire que circula entre la madera. Normalmente, en el arranque de un proceso de secado se requiere mantener durante algunas horas un elevado porcentaje de humedad en el aire y para llenar esas necesidades de manejar la humedad relativa del aire se utiliza dos elementos: caños para inyección de vapor y chimeneas para intercambio de aire con el exterior.

## ➤ Sistema de control

Es automático que si bien es el más costoso, garantiza un control exacto de las condiciones al interior del secadero como son la temperatura y la humedad relativa del aire. Están provistos de sensores de humedad y temperatura, pero tienen además un computador que analiza la situación en la celda de forma casi continua. El control completamente automático permite la memorización anticipada de todos los datos de la tabla de secado, pudiendo así verificar la evolución del proceso en forma automática hasta la finalización del mismo, incluso sin la presencia del operador.

## 4.2 Cálculos térmicos

Las condiciones climáticas de la localidad donde se realizará el montaje de la cámara de secado son:

País:	Ecuador.
Provincia:	Chimborazo.
Ciudad:	Riobamba.
Altura:	2754 m.s.n.m.
Temperatura promedio:	14°C
Humedad relativa:	62 %
Humedad de equilibrio de la madera:	12 %
Presión atmosférica	73594,16 Pa
Velocidad promedio del viento	3.61 m/s

El rango de temperatura máxima es de 60 a 80 °C para maderas pesadas. Por verificación en otras cámaras de secado instaladas en la localidad la temperatura en el interior de la cámara es de 75 °C, teniendo en cuenta que para madera verde y recién aserrada, con un contenido de humedad mayor que 30 %, debe realizarse un proceso lento de secado para evitar defectos como grietas internas, rajaduras, etc. [7]

Las paredes y techo presentan más de un material, es decir compuesta, la analogía eléctrica puede usarse para resolver este tipo de problemas que involucran las resistencias térmicas, La ecuación de flujo de calor para este tipo de problemas puede escribirse como: [19]

$$Q = \frac{\Delta T}{\sum R_T} \quad (4.1)$$

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 \quad (4.2)$$

Donde:

$R_T$	Resistencia térmica total.	[°C/W]
$R_1$	Resistencia por convección forzada aire caliente-pared.	[°C/W]
$R_2$	Resistencia por conducción en la lámina galvanizada.	[°C/W]
$R_3$	Resistencia por conducción en el aislante térmico.	[°C/W]
$R_4$	Resistencia por conducción en la lámina galvanizada.	[°C/W]
$R_5$	Resistencia por convección forzada pared-aire ambiente.	[°C/W]
$T_i$	Temperatura en el interior de la cámara.	[°C]

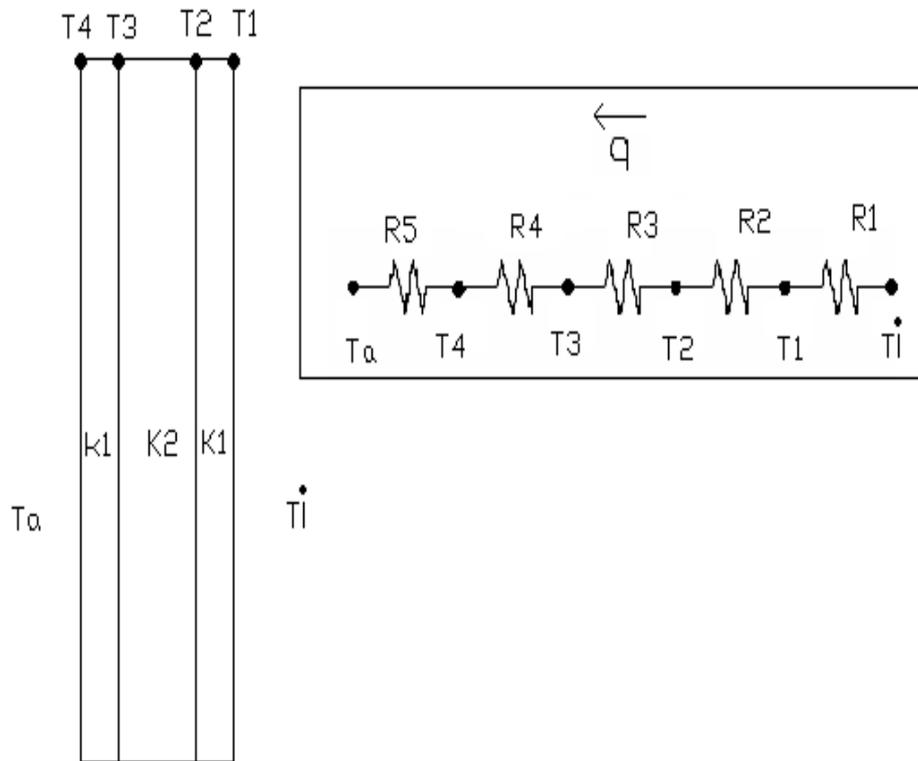
$T_a$	Temperatura ambiente.	[°C]
$T_{pi}$	Temperatura de la pared interior.	[°C]
$T_{pe}$	Temperatura de la pared exterior.	[°C]

La pared está constituida de la siguiente manera y sus características se encuentran en Anexos 1:

**Tabla 4.2** Espesores de los elementos de las paredes y techo.

<b>Elemento</b>	<b>Espesor</b>
Paneles de lámina galvanizada Espesor de la lámina	1/32"
Aislamiento térmico Lana de vidrio	2"

El análogo eléctrico de la pared compuesta por dos láminas galvanizadas separadas por el aislante térmico queda representado de la siguiente manera:



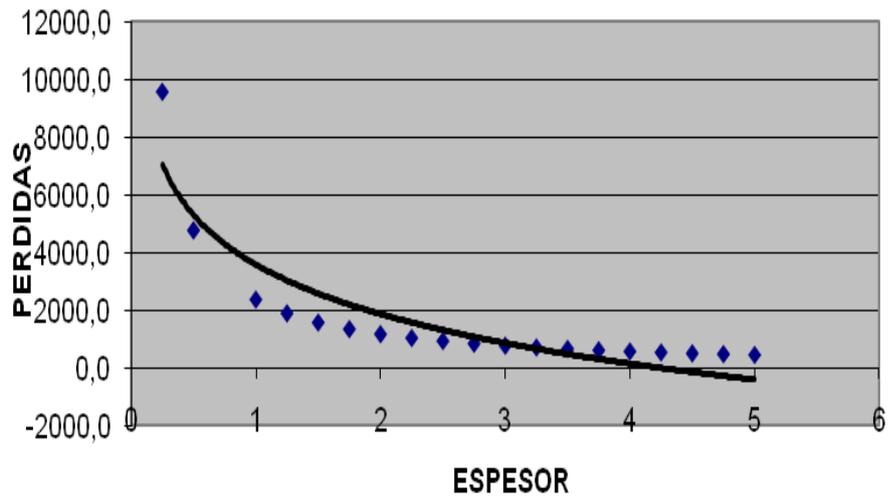
**Figura 4.5** Pared compuesta y análogo eléctrico

Los valores de las propiedades térmicas de los elementos que conforman la pared compuesta son consultados en tablas ya establecidas para diferentes tipos de materiales y adjuntado en Anexo A.

#### **4.2.1 Determinación del espesor del aislante térmico.**

En función del área y de la resistencia se estable las pérdidas con diferentes espesores, de tal manera que se tiene una gráfica en la cual nos indica el espesor adecuado y según la facilidad de adquisición en el mercado.

## SELECCION ESPESOR DEL AISLANTE



**Figura 4.6** Pérdidas en función del espesor del aislante.

Se selecciona un espesor de 2 pulgadas puesto que se encuentra fácilmente en el mercado y lógicamente la gráfica nos indica ser el apropiado.

### **4.2.2 Determinación de las resistencias térmicas y pérdidas.**

#### **Determinación $R_1$**

Una técnica convencional que se usa en la correlación de datos experimentales es el análisis dimensional, en el que se producen grupos adimensionales adecuados como el número de Reynolds siendo éste el indicador si el flujo es laminar cuando su valor es menor a  $5 \times 10^5$  y para valores mayores como flujo turbulento, siendo su ecuación:

$$Re = \frac{v \cdot Lc}{\nu} \quad (4.3)$$

Donde:

Re	Número de Reynolds.	
$v$	Velocidad del fluido (aire)	[m/s]
$Lc$	Longitud característica	[ m ]
$\nu$	Viscosidad cinemática a la temperatura interior	[m <sup>2</sup> /s]

Para determinar el número de Reynolds, evaluamos las propiedades, con la temperatura fílmica. El valor de  $Lc$  depende de la dirección del flujo de aire al interior del secadero. Sin embargo para una placa vertical se considera que  $Lc$  es igual a la altura de la placa plana. **[20]**

$$Tf = \frac{T_i + T_{pi}}{2} \quad (4.4)$$

Donde:

$Tf$	Temperatura fílmica	[°C]
$T_i$	Temperatura inicial del fluido	[°C]
$T_{pi}$	Temperatura final del fluido en la pared interior	[°C]

$$Tf = \frac{75 + 70}{2}$$

$$Tf = 72.5 \text{ °C}$$

Se procede al cálculo del número de Reynolds con las propiedades obtenidas en tablas en función de la temperatura fílmica:

$$Re = \frac{(2)(4.3)}{20.407 \times 10^{-6}}$$

$$Re = 421424$$

Para determinar el número de Nusselt en una placa plana con flujo forzado, se utiliza la ecuación, teniendo como referencia que  $Re < 5 \times 10^5$ , sobre toda la longitud de la placa. [20]

$$Nu = 0.662(Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3}) \quad (4.5)$$

Siendo Pr el número de Prandtl se obtiene de tablas adjuntadas en Anexo A

$$Nu = 0.662(421424^{1/2})(0.698^{1/3}).$$

$$Nu = 378.18$$

$$h_1 = \frac{Nu \cdot k_1}{L_c} \quad (4.6)$$

Donde:

$h_1$       Coeficiente de transferencia de calor por convección **[21]**       $[W/m^2 \text{ } ^\circ C]$

$k_1$       Conductividad térmica del aire a la temperatura fílmica       $[W/m \text{ } ^\circ C]$

$$h_1 = \frac{(378.18) (0.03)}{4.3}$$

$$h_1 = 2.63 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ C$$

Por tanto:

$$R_1 = \frac{1}{h_1 \cdot A} \quad (4.7)$$

$R_1$  Resistencia por convección forzada aire caliente-pared  $[\text{°C/W}]$

A Área de las paredes

$$R_1 = \frac{1}{(2.63)(4.3 \times 4)}$$

$$R_1 = 2.2 \times 10^{-2} \text{ °C/W}$$

#### Determinación de $R_2$ y $R_4$ .

Cálculo de la resistencia térmica por conducción en las paredes de lámina galvanizada de espesor 1/32" y con su respectiva conductividad térmica consultada en tablas de propiedades de los materiales y adjuntada en Anexos 1.

$$R_2 = \frac{e}{k_2 \cdot A}$$

Donde:

e espesor de la pared galvanizada  $[m]$

$k_2$  Conductividad térmica de la lámina galvanizada  $[W/\text{°Cm}]$

A Área de la pared  $[m^2]$

$$R_2 = \frac{7.93 \times 10^{-4}}{(164)(4.3 \times 3)}$$

$$R_2 = 3.74 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

Puesto que tanto  $R_2$  como  $R_4$  van a tener valores similares y aproximados a cero estos son ignorados.

### Determinación de $R_3$

Influenciado principalmente por la intervención del aislante térmico seleccionado anteriormente siendo lana de vidrio con sus características en Anexos 1 su ecuación será: **[20]**

$$R_3 = \frac{e}{k_3 \cdot A}$$

Donde:

e	Espesor del aislante térmico	[m]
$k_3$	Conductividad térmica del aislante.	[W/m $^\circ\text{C}$ ]

$$R_3 = \frac{0.0508}{3.80 \times 10^{-2} \times (4.3 \times 4)}$$

$$R_3 = 7.7 \times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

Realizando la respectiva tabla tenemos:

**Tabla 4.3** Valores calculados de  $R_3$

	Espesor	$K_3$	Número de Paredes	Área	$R_2$
<b>Pared 4.30x4</b>	0.0508	$3.80 \times 10^{-2}$	2	17.2	$1.5 \times 10^{-1}$
<b>Pared 4.30x7.60</b>	0.0508	$3.80 \times 10^{-2}$	2	32.68	$8.1 \times 10^{-2}$
<b>Techo 4x7.60</b>	0.0508	$3.80 \times 10^{-2}$	1	30.4	$8.7 \times 10^{-2}$

### Determinación de $R_5$

Para determinar  $R_5$  se tendrá en cuenta que tenemos nuevamente un caso de convección forzada puesto que hay una velocidad del viento de 3.61 m/s en la localidad que afecta directamente a la cámara de secado.

$$T_f = \frac{T_a + T_{pe}}{2}$$

Donde:

$T_f$  Temperatura fílmica [°C]

$T_a$  Temperatura ambiente crítica [°C]

$T_{pe}$  Temperatura en la pared exterior [°C]

$$T_f = \frac{8 + 40}{2}$$

$$T_f = 24 \text{ °C}$$

$$Re = \frac{v.Lc}{\nu}$$

$$Re = \frac{(3.61)(4.3)}{16,399 \times 10^{-6}}$$

$$Re = 946582.1$$

El valor de Reynolds nos indica que el flujo es turbulento.

$$Nu = 0.029(Re^{0.8} \cdot Pr^{0.43}) \quad (4.8)$$

$$Nu = 0.029(946582.1^{0.8})(0.709^{0.43})$$

$$Nu = 1506$$

$$h_5 = \frac{Nu \cdot k_5}{Lc}$$

$h_5$       Coeficiente de transferencia de calor por convección libre en la pared exterior de la cámara. [W/m<sup>2</sup> °C]

$k_5$       Conductividad térmica del aire a la temperatura exterior fílmica. [W/m °C]

$$h_5 = \frac{(1506)(0.026)}{4.3}$$

$$h_5 = 9.10 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$$

$$R_5 = \frac{1}{h_5 \cdot A}$$

$$R_5 = \frac{1}{9.10 \times 4.3 \times 3}$$

$$R_5 = 8.5 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

Con los valores obtenidos mediante un cálculo iterativo de  $T_{pi}$  y  $T_{pe}$  se realiza el refinamiento de  $R_1$  y  $R_5$ .

### Determinación $R_1$ refinado

$$T_f = \frac{T_i + T_{pi}}{2}$$

$$T_f = \frac{75 + 73}{2}$$

$$T_f = 74 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$Re = \frac{(2)(4.3)}{20.525 \times 10^{-6}}$$

$$Re = 419001.2$$

$$Nu = 0.662(Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3})$$

$$Nu = 0.662(419001.2^{1/2})(0.698^{1/3}).$$

$$Nu = 380.1$$

$$h_1 = \frac{Nu \cdot k_1}{L_c}$$

$$h_1 = \frac{(380.1)(0.03)}{4.3}$$

$$h_1 = 2.65 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$R_1 = \frac{1}{h_1 \cdot A}$$

$$R_1 = \frac{1}{(2.65)(4.3 \times 4)}$$

$$R_1 = 2.92 \times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

Con el programa Excel elaboramos una tabla tomando en cuenta que Reynolds está en función de Lc, por tanto puede pasar de flujo laminar a turbulento de tal manera que cambiará la ecuación siendo la siguiente de ser el caso:

$$\text{Nu} = 0.029(\text{Re}^{0.8} \cdot \text{Pr}^{0.43})$$

	Lc	Re	Nu	h <sub>1</sub>	Número de Paredes	Área Total	R <sub>1</sub>
<b>Pared 4.3x4</b>	4.3	419001.2	380.1	2.65	2	12.9	4.3x10 <sup>-2</sup>
<b>Pared 4.30x7.60</b>	4.3	419001.2	380.1	2.65	2	32.68	2.3x10 <sup>-2</sup>
<b>Techo 4x7.60</b>	4	389768.5	366.6	2.74	1	30.4	1.2x10 <sup>-2</sup>

**Tabla 4.4** Valores calculados de R<sub>1</sub>.

#### Determinación R<sub>5</sub> refinado

$$T_f = \frac{T_a + T_{pe}}{2}$$

$$T_f = \frac{8 + 22.5}{2}$$

$$T_f = 15.25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{Re} = \frac{v \cdot Lc}{\nu}$$

$$Re = \frac{(3.61)(4.3)}{15,11 \times 10^{-6}}$$

$$Re = 1027332.9$$

$$Nu = 0.029(Re^{0.8} \cdot Pr^{0.43})$$

$$Nu = 0.029(1027332.9^{0.8})(0.711^{0.43})$$

$$Nu = 1614.6$$

$$h_5 = \frac{Nu \cdot k_5}{Lc}$$

$$h_5 = \frac{(1614.6)(0.025)}{4.3}$$

$$h_5 = 9,38 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$R_5 = \frac{1}{h_5 \cdot A}$$

$$R_5 = \frac{1}{9.38 \times 17.2}$$

$$R_5 = 8.26 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

**Tabla 4.5** Valores calculados de  $R_5$

	Lc	Re	Nu	$h_1$	Número de Paredes	Área Total	$R_1$
<b>Paredes</b>	4.3	1027332.9	1614.6	9,38	2	12.9	$1.2 \times 10^{-2}$

<b>4.3x4</b>							
<b>Paredes 4.3x7.6</b>	4.3	1027332.9	1614.6	9,38	2	32.68	$6.5 \times 10^{-3}$
<b>Techo 4x7.6</b>	4	955658.5	1523.8	9.52	1	22.8	$3.5 \times 10^{-3}$

$$Q_{FRONTALES} = \frac{\Delta T}{\sum R_T}$$

$$Q_{FRONTALES} = \frac{75 - 8}{0.1105}$$

$$Q_{FRONTALES} = 606.3 \text{ W}$$

$$Q_{LATERALES} = \frac{75 - 8}{0.205}$$

$$Q_{LATERALES} = 326.8 \text{ W}$$

$$Q_{TECHO} = \frac{75 - 8}{0.102}$$

$$Q_{TECHO} = 653.7 \text{ W}$$

$$Q_{SUELO} = 0 \quad \text{Despreciable}$$

$$\dot{Q}_p = 1586.8 \text{ W}$$

### 4.2.3 Sistema de ventilación.

#### 4.2.3.1 Caudal de aire requerido. [22]

Los ventiladores axiales son probablemente los más sencillos y mejor conocidos de todos los tipos de ventiladores. Pudiendo ser estos de accionamiento directo o de accionamiento por correa, instalados en la pared o en el techo. El aire fluye paralelamente al eje. La velocidad del aire recomendado para el secado de madera es de 2 m/s, por lo tanto el caudal depende de esta velocidad y básicamente del área por el cual va a circular el aire a través de las pilas, a esta se la conoce como área libre. [23]

$$V = 3600A.v \quad (4.9)$$

$$A = \frac{s}{s+e}(L.a) + x$$

Donde:

V	Caudal de aire.	[m <sup>3</sup> /h]
A	Área libre.	[m <sup>2</sup> ]
v	Velocidad de aire.	[m/s]
s	Espesor de los separadores.	[mm]
e	Espesor de la madera.	[mm]
L	Longitud de la madera.	[m]
a	Altura de la pila.	[m]
x	Área libre lateral de la pila	[m <sup>2</sup> ]

Por medio de la **Tabla I** seleccionamos las dimensiones de los separadores los mismos que están en función del espesor de la madera a secar para así obtener una correcta circulación de aire entre pilas.

$$A = \frac{0.025}{0.025 + 0.025} (2.40 \times 3.3) + 0.6$$

$$A = 4.56 \text{ m}^2$$

$$V = (3600)(4.56)(2)$$

$$V = 32832 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$V = 9.12 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V = 20643.8 \text{ CFM}$$

#### 4.2.3.2 Caída de presión a través de las pilas.

La caída de presión del aire que circula al interior del secadero, depende de la distancia que debe circular a través de las pilas de madera. **[23]**

$$r_a = \frac{p}{286(273 + T)} \quad (4.10)$$

Donde:

$r_a$	Peso específico del aire.	[Kg/m <sup>3</sup> ]
$p$	Presión del aire en Riobamba.	[Pa]
$T$	Temperatura media del aire en el secador.	[°C]

$$r_a = \frac{73594,16}{286(273 + 70)}$$

$$r_a = 0,75 \text{ Kg/m}^3$$

Se procede al cálculo de la caída de presión:

$$\Delta p = \frac{1000.F.\lambda.v^2.r_a}{2.s.g} \quad (4.11)$$

Donde:

$\Delta p$	Resistencia de las pilas	[mm H <sub>2</sub> O]
F	Profundidad de las pilas del recorrido de aire	[m]
$\lambda$	Factor de aspereza (0.02 - 0.08)	
v	Velocidad de flujo de aire	[m/s]
s	Espesor de los separadores	[mm]
g	Aceleración de la gravedad	[m/s <sup>2</sup> ]

$$\Delta p = \frac{(1000)(1.8)(0.08)(2)^2(0.75)}{(2)(2.5)(9.81)}$$

$$\Delta p = 8.8 \text{ mm H}_2\text{O} = 87.2 \text{ Pa}$$

#### **4.2.4 Sistema de calefacción.**

Este debe ser capaz de calentar la madera, el agua que contiene y suministrar el calor necesario para evaporar la humedad de la madera al nivel deseado, calentar el aire e incluso para reponer las pérdidas. Para dimensionar el sistema de calefacción se consideran los factores más desfavorables, ya que si se cubre las condiciones críticas de operación del secadero, se garantiza que este funcionará adecuadamente en cualquier otra condición.

##### **4.2.4.1 Etapa de calentamiento**

Puesto que el diseño se basa en los parámetros más críticos, la madera de Eucalipto presenta el mayor grado de dificultad a la hora de realizar el proceso de secado por cuando ésta es la especie con mayor porcentaje de humedad en la madera aserrada.

#### **Potencia requerida para calentar el agua contenida en la madera.**

Se estima en cada lote de secado el ingreso de 450 tablonos con las dimensiones antes indicadas y 300 separadores seleccionados en función del espesor de los tablonos. Siendo el peso de cada tablón de 6.5 kg y de cada separador de 1.62 Kg.

### Masa de madera húmeda

$$m_h = \rho_h \cdot v_h \quad (4.12)$$

Donde:

$\rho_h$	Densidad de la madera húmeda <b>[25]</b>	[Kg/m <sup>3</sup> ]
$v_h$	Volumen de madera húmeda incluido separadores	[m <sup>3</sup> ]

$$m_h = (720)(4.8)$$

$$m_h = 3456 \text{ Kg}$$

### Masa de agua contenida en la madera [26]

$$m_{\text{agua}} = \frac{m_h \cdot CH_{\text{verde}}}{100 + CH_{\text{verde}}} \quad (4.13)$$

Donde:

$m_h$	Masa húmeda de la madera	[Kg]
$CH_{\text{verde}}$	Contenido de humedad de la madera en estado verde	[%]

$$m_{\text{agua}} = \frac{(3456)(111.6)}{100 + 111.6}$$

$$m_{\text{agua}} = 1822.7 \text{ Kg}$$

$$H = \frac{m_h - m_o}{m_o}$$

$$H = \frac{3456 - 1822.7}{1822.7}$$

$$H = 89.6 \quad \%$$

## Potencia para calentar el agua [19]

$$\dot{Q}_{agua} = \frac{m_{agua} \cdot C_{p_{agua}} \cdot \Delta_T}{t} \quad (4.14)$$

Donde:

$C_{p_{agua}}$	Calor específico del agua	[KJ/Kg °C]
$\Delta_T$	Temperatura ambiente-inicio de secado	[°C]
t	Tiempo de calentamiento	[s]

El tiempo de calentamiento está en función de la especie y espesor en este caso requiere dos horas por centímetro para maderas densas, pero para la madera de eucalipto se recomienda una hora más por su alto contenido de humedad, es decir 6 horas.

$$\dot{Q}_{agua} = \frac{(1822.7)(4.2)(50-12)(1000)}{21600}$$

$$\dot{Q}_{agua} = 13467.9W$$

## Potencia para calentar la madera

Masa de madera

$$m_m = m_h - m_{agua} \quad (4.15)$$

$$m_m = 3426.5 - 1807.2$$

$$m_m = 1633.3 \text{ Kg}$$

$$\dot{Q}_{madera} = \frac{m_m \cdot C_{p_m} \cdot \Delta_T}{t} \quad (4.16)$$

Donde:

$C_{p_m}$	Calor específico del Eucalipto <b>[26]</b>	[J/Kg °C]
$\Delta_T$	Temperatura entre el ambiente y la de inicio de secado	[°C]
$t$	Tiempo de calentamiento	[s]

$$\dot{Q}_{madera} = \frac{(1633.3)(2786.02)(50 - 12)}{21600}$$

$$\dot{Q}_{madera} = 8005.3 \text{ W}$$

### Potencia para calentar el aire

$$\dot{Q}_{aire} = \frac{m_{aire} \cdot (h_2 - h_1)}{t} \quad (4.17)$$

Donde:

$m_{aire}$	Masa de aire	[Kg]
$h_1$	Entalpía inicial de aire húmedo	[J/Kg]
$h_2$	Entalpía final de aire húmedo	[J/Kg]

$$U_{aire} = U_{secadero} - U_m \quad (4.18)$$

Donde:

$V_{\text{aire}}$  Volumen de aire  $[\text{m}^3]$

$V_{\text{secadero}}$  Volumen del secadero  $[\text{m}^3]$

$$V_{\text{secadero}} = (4.30)(4.00)(7.60)$$

$$V_{\text{secadero}} = 130.72 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{madera}} = 6.23 \text{ m}^3$$

Por lo tanto:

$$V_{\text{aire}} = (130.72 - 6.23) \text{ m}^3$$

$$V_{\text{aire}} = 124.5 \text{ m}^3$$

### Densidad del aire

De la ecuación de los gases tenemos que

$$\rho_{\text{aire}} = \frac{P}{287(T + 273)} \quad (4.19)$$

P Presión atmosférica  $[\text{Pa}]$

T Temperatura promedio de calentamiento  $[\text{°C}]$

$$\rho_{\text{aire}} = \frac{73594.16}{287(((50 + 12) / 2) + 273)}$$

$$\rho_{\text{aire}} = 0.843 \text{ Kg/m}^3$$

### **Masa de aire**

$$m_{\text{aire}} = (\rho_{\text{aire}})(v_{\text{aire}}) \quad (4.20)$$

$$m_{\text{aire}} = (0.843)(124.5)$$

$$m_{\text{aire}} = 104.95 \text{ Kg}$$

Con la carta psicométrica se determina el valor de las entalpías y finalmente el calor requerido.

Con una temperatura inicial de 12 °C con una humedad relativa de 62%.

$$h_1 = 30835 \text{ J/Kg}$$

Con una temperatura final de 50 °C con una humedad relativa de 95%.

$$h_2 = 350085 \text{ J/Kg}$$

# Psychrometric Chart

Barometric Pressure: 73.59 kPa  
© A.J.Marsh '99

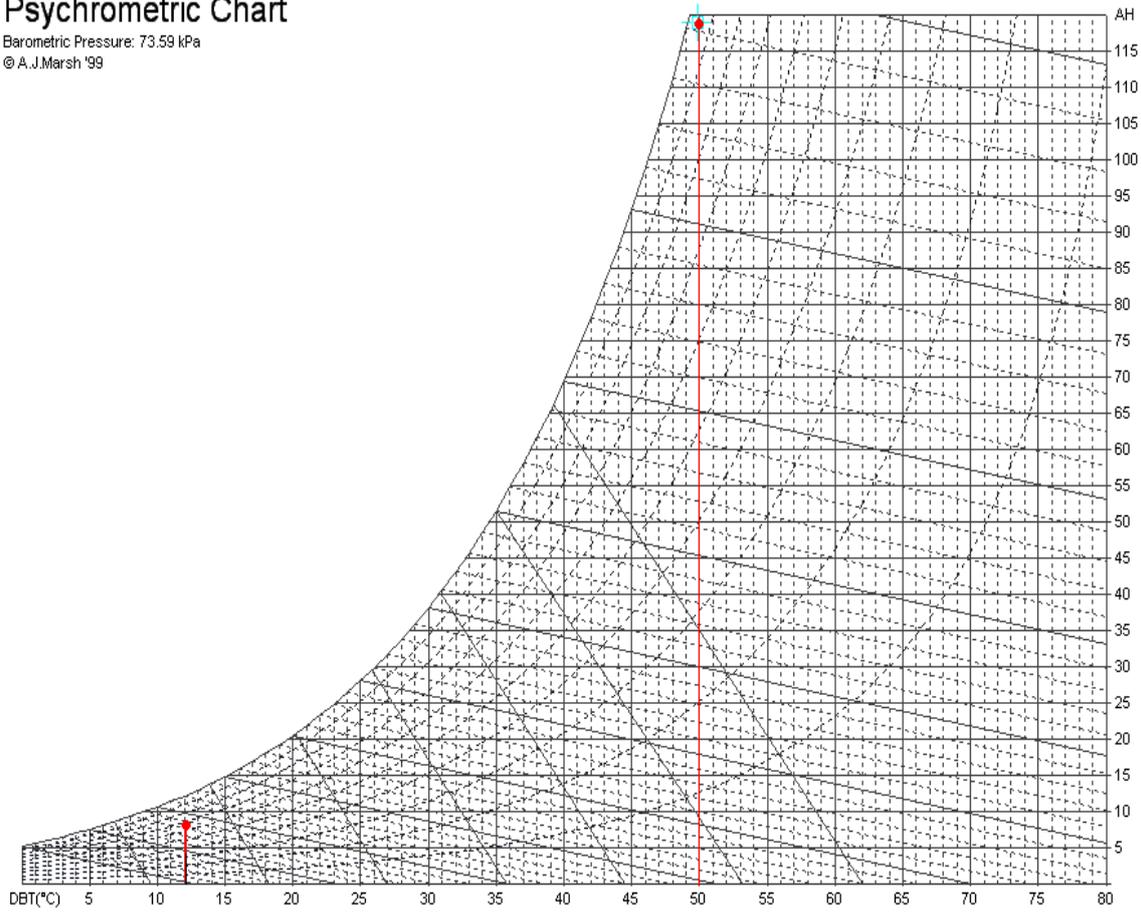


Figura 4.7 Determinación de las entalpías.

$$\dot{Q}_{aire} = \frac{(104.95)(350085 - 30835)}{3600}$$

$$\dot{Q}_{aire} = 9306.58 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{CALENTAMIENTO} = \dot{Q}_{madera} + \dot{Q}_{agua} + \dot{Q}_{aire} + \dot{Q}_{perdidas} \quad (4.21)$$

$$\dot{Q}_{CALENTAMIENTO} = 8005.3 + 13467.9 + 9306,6 + 1586.8$$

$$\dot{Q}_{CALENTAMIENTO} = 32366.6 \text{ W}$$

#### 4.2.4.2 Etapa de secado

La cámara tendrá un funcionamiento continuo de lunes a viernes ininterrumpidamente, del cual se reducen las 6 horas del calentamiento, de tal manera que la etapa de secado se lo realizará en 114 horas

#### Potencia para eliminar el agua de la madera [27]

Hasta el punto de saturación de las fibras, agua libre.

$$m_{\text{agua libre}} = \frac{m_h \cdot (CH_i - CH_{\text{psf}})}{100 + CH_i} \quad (4.22)$$

Donde:

$m_h$	Masa de madera húmeda	[Kg]
$C.H_i$	Contenido de humedad inicial	[%]
$C.H_{\text{psf}}$	Contenido de humedad en el P.S.F	[30%]

$$m_{\text{agua libre}} = \frac{(3456)(89.6 - 30)}{100 + 89.6}$$

$$m_{\text{agua libre}} = 1086.4 \text{ Kg}$$

## Potencia para eliminar el agua libre

Esta energía requerida para secar 1 Kg de agua contenida en la madera depende de la especie de madera y del régimen del secado. Con respecto a la especie de madera, tiene que ver predominante su peso específico, así tenemos la siguiente tabla. [28]

**Tabla 4.6** Consumo de energía térmica.

<b>CONSUMO DE ENERGIA TÉRMICA</b>		
<b>Peso específico de la madera</b>	<b>Agua libre 100% A 30%</b>	<b>Agua de constitución 30% A 60%</b>
Kg/m <sup>3</sup>	KJ	KJ
300 - 600	3500	4400
600 - 900	3800	4600
900 - 1200	4200	5000

$$\dot{Q}_{\text{agualibre}} = \frac{m_{\text{agualibre}} \cdot \varepsilon_{L1}}{t_s} \quad (4.23)$$

$\varepsilon_{L1}$       Energía térmica requerida para el secado      [J/Kg]

$t_s$       Tiempo de secado      [s]



$$\dot{Q}_{aguaconst} = \frac{(103.13)(4600000)}{410400}$$

$$\dot{Q}_{aguaconst} = 1156 \text{ W}$$

### Potencia para eliminar el agua de la madera

$$\dot{Q}_{agua} = \dot{Q}_{agua\text{libre}} + \dot{Q}_{aguaconst} \quad (4.26)$$

$$\dot{Q}_{agua} = 11215.3 \text{ W}$$

### Potencia para calentar el aire de reposición [30]

Una vez saturado el aire en el interior de la cámara, es necesario realizar un cambio de aire con las condiciones externas críticas, el ingreso y salida del aire se da por medio de las ventilas ubicadas en el techo.

Se considera que durante el proceso de secado habrá un cambio de aire del 10 %. Con las condiciones internas de secado de la cámara de 75 °C; 62 % HR y con las condiciones externas críticas de 8 °C; 62 %HR se calcula sus respectivas entalpías y el calor requerido. El valor del calor requerido será alto en relación con la etapa de calentamiento, puesto que estamos empleando un tiempo pequeño para recuperar las condiciones óptimas de secado.

$$Q_{aire} = \frac{m_{aire}(h_2 - h_1)}{t}(10\%) \quad (4.27)$$

$$Q_{aire} = \frac{(104.95)(1142839 - 22166)}{1200} (0.1)$$

$$\dot{Q}_{aire} = 9801.2 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{SECADO} = \dot{Q}_{agua} + \dot{Q}_{aire} + \dot{Q}_{perdidas} \quad (4.28)$$

$$\dot{Q}_{SECADO} = 11215.3 + 9801.2 + 1586.7$$

$$\dot{Q}_{SECADO} = 22603.2 \text{ W}$$

Se selecciona el calor mayor que corresponde a la etapa de calentamiento, siendo así utilizamos un coeficiente de seguridad del 30%

$$\dot{Q}_{CALENTAMIENTO} = 32366.6 (1.3) \text{ W}$$

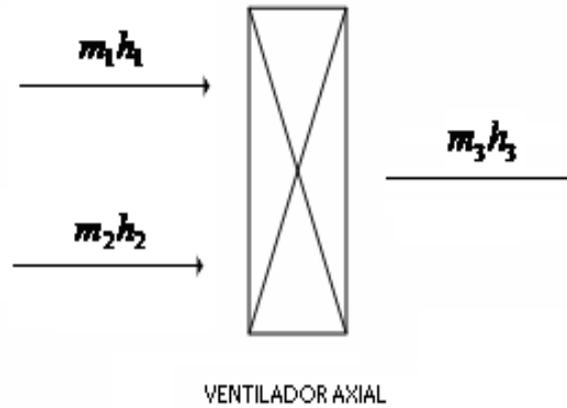
$$\dot{Q}_{CALENTAMIENTO} = 42076.6 \text{ W}$$

#### 4.2.4.3 Diseño del intercambiador de calor.

Para este tipo de aplicaciones se utiliza intercambiadores de calor de flujo cruzado, para los cálculos se debe considerar la mayor potencia requerida, en este caso corresponde a la etapa de calentamiento.

$$Q = 42076.6 \text{ W}$$

Para obtener la temperatura de entrada del fluido frío se realiza un balance energético en el ventilador.



**Figura 4.8** Balance energético

El valor de  $C_p$  es obtenido mediante una interpolación con un valor de temperatura de  $T_{sa} = 75 \text{ }^\circ\text{C}$ .

$$m_1 h_1 + m_2 h_2 = m_3 h_3 \quad (4.29)$$

$$h = C_p \cdot T \quad (4.30)$$

Donde:

$m_1$	Flujo másico de aire re-circulado	[Kg/h]
$m_2$	Flujo másico de aire renovado	[Kg/h]
$m_3$	Flujo másico de aire a la salida mezclado $m_1 + m_2$	[Kg/h]
$h_{1,2,3}$	Entalpías	[J/Kg]
$C_p$	Calor específico	[KJ/Kg $^\circ\text{C}$ ]

$$m_1 = 0.90.V.\rho_1 \quad (4.31)$$

$$m_1 = (0.90)(32832)(0.843)$$

$$m_1 = 24909.63 \text{ Kg/h}$$

$$h_1 = (1008.9)(348)$$

$$h_1 = 351097.2 \text{ J/Kg}$$

El cálculo de  $m_2$  se encuentra en función de la densidad del aire con las condiciones de la temperatura ambiente a 8 °C.

$$m_2 = 0.10.V.\rho_2$$

$$m_2 = (0.10)(32832)(0.915)$$

$$m_2 = 3006.5 \text{ Kg/h}$$

$$h_2 = (1005.5)(281)$$

$$h_2 = 282545.5 \text{ J/Kg}$$

$$m_3h_3 = m_1h_1 + m_2h_2 \quad [\text{J/s}]$$

$$m_3h_3 = (24909.63)(351097.2) + (3006.5)(282545.5)$$

$$m_3h_3 = 1.33 \times 10^{10}$$

$$h_3 = 343714.3 \text{ J/Kg}$$

$$T_3 = T_{ei} = \frac{h_3}{C_p} \quad (4.32)$$

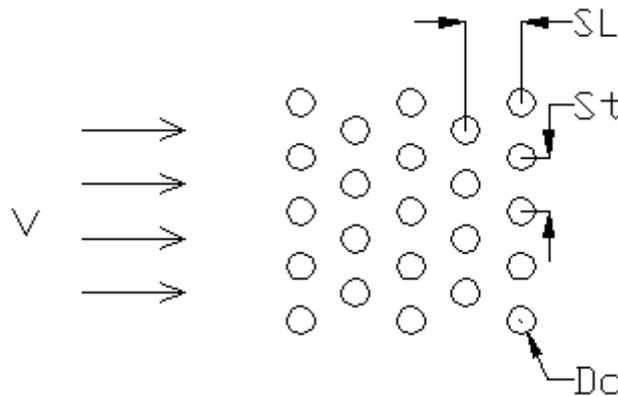
Donde:

$T_{ei}$  Temperatura de entrada al intercambiador [°C]

$$T_{ei} = \frac{343714.3}{1006.6}$$

$$T_{ei} = 341.5 \text{ K} = 68.5 \text{ °C} = T_{ea}$$

Se evalúan las propiedades del aire a la temperatura media de película basada en la temperatura de las paredes de los tubos así como la media de la temperatura de masa del aire a la entrada y salida del intercambiador para luego realizar un proceso iterativo con su refinamiento respectivo.



**Figura 4.9** Corte transversal de un intercambiador de calor.

### Temperatura de entrada del aire

$$T_{ea} = 68.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

### Temperatura de salida del aire

$$T_{sa} = 75 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{prom} = \frac{T_{ea} + T_{sa}}{2} \quad (4.33)$$

Donde:

$T_{prom}$             Temperatura promedio del aire            [ $^\circ\text{C}$ ]

$$T_{prom} = \frac{68.5 + 75}{2}$$

$$T_{prom} = 71.75 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$Pr_a = \frac{C_{p_a} \mu_a}{k_a} \quad (4.34)$$

Donde:

$C_p$     Calor específico del aire            [ $\text{KJ/Kg}^\circ\text{C}$ ]

$k$       Conductividad térmica del aire            [ $\text{W/m}^\circ\text{C}$ ]

$\mu_a$     Viscosidad dinámica            [ $\text{Kg/m.s}$ ]

$$C_p = 1.00865 \text{ KJ/Kg}^\circ\text{C}$$

$$k_{\text{aire}} = 0.03 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$\mu_a = 2.093 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$$

Las propiedades físicas del aire son tomadas de Anexo 3 Anexo 4 y Anexo 5.

$$Pr_a = \frac{Cp_a \mu_a}{k_a}$$

$$Pr_a = \frac{(1008,65)(0.00002093)}{0.03}$$

$$Pr_a = 0.694$$

Todas las propiedades son evaluadas a la temperatura fílmica y a la presión atmosférica excepto  $Pr_w$ . La temperatura de superficie del tubo, se asume como la temperatura de saturación a la presión de 50 Psi y luego mediante un proceso iterativo se calcula la temperatura real.

$$T_{sat} = T_w = 138.25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$T_w$  es calculado luego de un proceso iterativo.

$$T_f = \frac{T_{prom} + T_w}{2}$$

$$T_f = \frac{71.75 + 85.6}{2}$$

$$T_f = 78.67 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Con la temperatura de pared o temperatura fílmica evaluamos las propiedades:

$$Cp_w = 1.0095 \text{ KJ/Kg}$$

$$\rho_a = 0.734 \text{ Kg/m}^3$$

$$k_{aire} = 0.03 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$\mu_w = 2.096 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Pr}_w = \frac{Cp_w \mu_w}{k_w}$$

$$\text{Pr}_w = \frac{(1009.5)(0.00002096)}{0.03}$$

$$\text{Pr}_w = 0.705$$

Velocidad del aire a la entrada del intercambiador **[30]**

$$V_a = \frac{V}{A_f} \tag{4.35}$$

Donde:

V	Caudal entregado por los ventiladores	[m <sup>3</sup> /h]
A <sub>f</sub>	Área frontal al ingreso del intercambiador	[m <sup>2</sup> ]
V <sub>a</sub>	Velocidad del aire a la entrada del intercambiador	[m/h]

$$A_f = \frac{V}{V_a}$$

$$A_f = \frac{32832}{7200}$$

$$A_f = 4.56 \text{ m}^2$$

Velocidad máxima, los valores de S<sub>T</sub>, S<sub>L</sub>, y D se encuentran en Anexo 6:

$$\frac{S_T}{D_E} = 3 \tag{4.36}$$

Seleccionando tubos de cobre para vapor de  $D_n = 3/4''$ . Con sus características en

Anexo 7

$$D_E = 22.23 \text{ mm} \quad D_i = 18.92 \text{ mm} \quad e_t = 1.651 \text{ mm} \quad k_{cu} = 381 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$S_T = 3D_E$$

$$S_T = 3x(22.23)$$

$$S_T = 6.66 \text{ cm}$$

Para un banco de tubos con arreglo en línea: **[20]**

$$V_{\max 1} = \frac{V_{\infty} S_T}{S_T - D} \quad (4.37)$$

$$V_{\max 1} = \frac{(2) (0.0666)}{0.0666 - 0.02223}$$

$$V_{\max 1} = 3 \text{ m/s}$$

$$Re_a = \frac{\rho_a V_{\max} D_e}{\mu_w} \quad (4.38)$$

Donde:

$\rho_a$	Densidad del aire en Riobamba	[Kg/m <sup>3</sup> ]
$\mu_w$	Viscosidad del aire evaluada a temperatura fílmica	[m <sup>2</sup> /s]
$D_e$	Diámetro exterior de la tubería de cobre	[m]

$$Re_a = \frac{(0.734)(3)(0.02223)}{0.00002096}$$

$$Re_a = 2335.4$$

$$1000 < Re < 2 \times 10^5$$

Cálculo del coeficiente de convección para un banco de tubos según Zhukauskas el Número de Nusselt:

$$Nu = C Re^m Pr_a^{0.36} \left( \frac{Pr_a}{Pr_w} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (4.39)$$

Factores C y m se obtiene de la tabla adjuntada en Anexo 6:

$$Nu = (0.317)(2335.4^{0.608})(0.694)^{0.36} \left( \frac{0.694}{0.705} \right)^{\frac{1}{4}}$$

$$Nu = 35$$

Corrección del número de Nusselt

$$Nu_a = C_2 Nu \quad (4.40)$$

Factor de corrección en Anexo 8 para para  $N_L < 10$ , en función del número de hileras y del tipo de arreglo de tubos en este caso tipo alineado y  $N_L = 1$ . [20]

$$C_2 = 0.64$$

$$Nu_a = (0.64)(35)$$

$$Nu_a = 22.4$$

Coefficiente de convección

$$Nu = \frac{hL_c}{k_f} \quad (4.41)$$

Longitud característica es igual al diámetro del tubo para este caso

$$h = \frac{(22.4)(0.03)}{0.02223}$$

$$h = 30.2 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$$

Coefficiente de convección corregido

$$h_a = \frac{h_{R_f} h_a}{h_{R_f} + h_a} \quad (4.42)$$

$$h_{R_f,o} = \frac{1}{R_{f,o}} \quad (4.43)$$

Donde:

$R_{f,o}$  Factor de incrustación en la superficie externa del tubo [m<sup>2</sup>°C/W]

De tablas en Anexo 9 tenemos un factor de:

$$R_{f,o} = 0.0004 \text{ m}^2\text{°C/W}$$

$$h_{R_{f,o}} = \frac{1}{0.0004}$$

$$h_a = \frac{(2500)(30.2)}{(2500) + (30.2)}$$

$$h_a = 29.9 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

$$T_{a,o} = T_w - (T_w - T_{ei}) \exp\left(-\frac{A_s * h_a}{m C_p}\right) \quad (4.44)$$

Donde:

$T_w$	Temperatura de pared del tubo.	[m]
$T_{a,o}$	Temperatura del aire a la salida del banco de tubos.	[°C]
$h_a$	Coeficiente de transferencia de calor corregido.	[W/m <sup>2</sup> °C]
$C_p$	Calor específico del fluido externo.	[W/m°°C]

$$A_s = N\pi DL + A_{cd} \quad (4.45)$$

Donde:

$A_s$	Área superficial de transferencia de calor.	[m <sup>2</sup> ]
$N$	Número total de tubos en el banco.	
$D$	Diámetro exterior del tubo.	[m]

L	Longitud de los tubos.	[m]
A <sub>cd</sub>	Área del colector y distribuidor.	[m <sup>2</sup> ]

$$A_s = (15)(3.1415)(0.02223)(0.6) + 0.92$$

$$A_s = 1.54m^2$$

$$\dot{m} = \rho V (N_T S_T L) \quad (4.46)$$

Donde:

$\dot{m}$	Gasto másico del fluido.	[Kg/s]
$\rho$	Densidad del fluido externo.	[kg/m <sup>3</sup> ]
N <sub>T</sub>	Número de tubos en el plano transversal al fluido.	

$$\dot{m} = (0.734)(2)(18)(0.0666)(0.8)$$

$$\dot{m} = 1.06 \frac{kg}{s}$$

$$T_{a,o} = 85.6 - (85.6 - 68.5) \exp\left(-\frac{1.7 * 31.7}{1.23 * 1009.17}\right)$$

$$T_{a,o} = 69^\circ C$$

Las propiedades del líquido saturado se evalúan a temperatura fílmica para lo cual se asume en primera instancia la temperatura de la pared interna del tubo como T<sub>sat</sub>, pero luego de realizar el respectivo proceso iterativo se determinó su valor real. Con una presión de 50 psi tenemos:

$$T_i = 138.25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_f = \frac{T_i + T_{sat}}{2}$$

Donde:

$T_i$       Temperatura interior del tubo.      [ $^\circ\text{C}$ ]

$$T_f = \frac{138 + 138.25}{2}$$

$$T_f = 138.125$$

### Como gas

$$\rho_g = 3.59 \text{ Kg/m}^3$$

$$h_g = 2731.2 \text{ KJ/kg}$$

$$\mu = 13.58 \times 10^{-6} \text{ Pa.s}$$

$$k_g = 0.029 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$Cp_g = 2297.5 \text{ KJ/Kg}^\circ\text{C}$$

### Como líquido saturado

$$\rho_f = 927.68 \text{ Kg/m}^3$$

$$h_f = 581.6 \text{ KJ/kg}$$

$$\mu_f = 199 \times 10^{-6} \text{ Pa.s}$$

$$k_f = 0.683 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$Cp_f = 4278.6 \text{ KJ/Kg}^\circ\text{C}$$

$$h_{fg} = 2149.6 \text{ KJ/kg}$$

$$h_v = 0.555 \left[ \frac{g \rho_f (\rho_f - \rho_g) k_f^3}{\mu_f (T_{sat} - T_i) D_i} (h_{fg}) \right]^{1/4} \quad (4.47)$$

Donde:

$g$	Aceleración gravitacional.	[m/s <sup>2</sup> ]
$\rho_f \rho_g$	Densidades del líquido y del vapor respectivamente.	[Kg/m <sup>3</sup> ]
$\mu_f$	Viscosidad del líquido.	[Kg/m*s]
$k_f$	Conductividad térmica del fluido	[W/m°C]
$h_{fg}$	Calor latente de vaporización	[J/Kg]

$$h_v = 0.555 \left[ \frac{(9.8)(927.68)(927.68 - 3.59)0.683^3}{199 * 10^{-6} (138.25 - 138)(0.01892)} (2297500) \right]^{1/4}$$

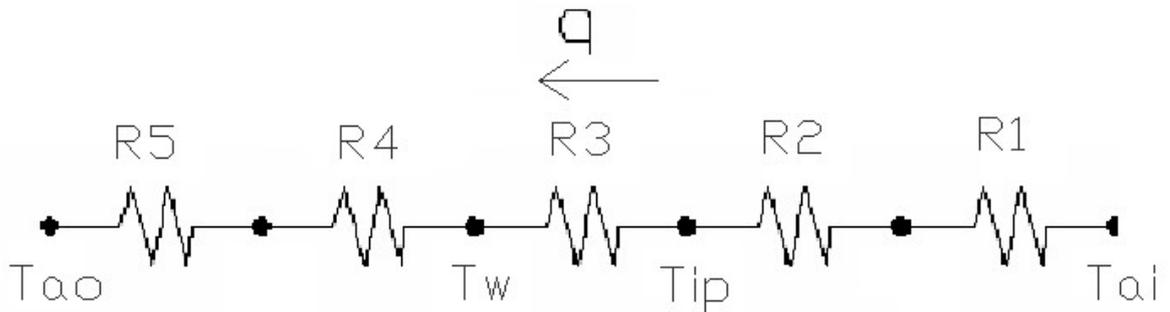
$$h_v = 27596.5 \text{ W/m}^2 \text{ °C}$$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_a \eta_f} + \frac{R_{f,0}}{\eta_f} + R_w + R_{f,i} \left( \frac{A_s}{A_i} \right) + \frac{1}{h_v} \left( \frac{A_s}{A_i} \right) \quad (4.48)$$

Donde:

$U$	Coeficiente global de transferencia de calor.	[W/m°C]
$R_{f,0}$	Factor de incrustación en la superficie externa del tubo.	[m <sup>2</sup> °C/W]
$R_{f,i}$	Factor de incrustación en la superficie interna del tubo.	[m <sup>2</sup> °C/W]
$R_w$	Resistencia de pared respecto a la superficie externa del tubo	[m <sup>2</sup> °C/W]

$h_a, h_v$	Coefficientes de convección externo e interno	[W/ m <sup>2</sup> °C]
$A_s$	Área superficial de transferencia de calor	[m <sup>2</sup> ]
$A_i$	Área interna del tubo	[m <sup>2</sup> ]



**Figura 4.10** Diagrama de resistencias en el tubo

El valor de los factores de incrustaciones se encuentran en Anexo 9:

$$R1 = \frac{1}{h_v} \left( \frac{A_s}{A_i} \right)$$

$$R2 = R_{f,i} \left( \frac{A_s}{A_i} \right)$$

$$R3 = R_w$$

$$R4 = \frac{R_{f,o}}{\eta_f}$$

$$R5 = \frac{1}{h_a \eta_f}$$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{(29.9)(1)} + \frac{0.0004}{1} + 4.69 \cdot 10^{-6} + 0.0001 \left( \frac{1.54}{0.66} \right) + \frac{1}{27596.5} \left( \frac{1.54}{0.66} \right)$$

$$A_i = \pi * D_i * L_t * N_t$$

$$A_i = \pi * 0.01892 * 0.6 * 15$$

$$A_i = 0.534 m^2$$

$\eta_f = 1$  Por no poseer aletas

$$R_w = \frac{De}{2k_{cu}} \ln\left(\frac{De}{De - 2(e_t)}\right) \quad (4.49)$$

$K_{cu}$  Conductividad térmica del cobre. (Anexos) [W/m°C]

$e_t$  Espesor del tubo. [m]

$$R_w = \frac{0.02223}{2(381)} \ln\left(\frac{0.02223}{0.02223 - 2(1.651 * 10^{-3})}\right)$$

$$R_w = 4.69 * 10^{-6}$$

$$\frac{1}{U} = 0.034$$

$$U = 29.16 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

Se asume un proceso a temperatura constante para iniciar el proceso iterativo con un intercambiador de flujo cruzado.

$$LMTD = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (4.50)$$

$$\Delta T_1 = T_{sat} - T_{ao}$$

$$\Delta T_1 = 138.25 - 68.9$$

$$\Delta T_1 = 69.34^\circ \text{C}$$

$$\Delta T_2 = T_{sat} - T_a$$

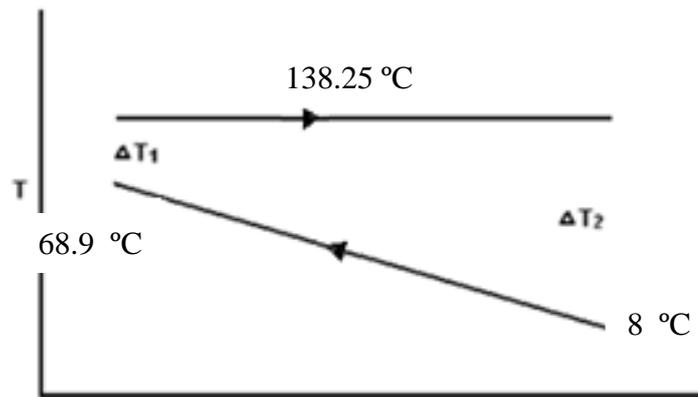
$$\Delta T_2 = 138.25 - 8$$

$$\Delta T_2 = 130.25^\circ \text{C}$$

$$LMTD = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}$$

$$LMTD = \frac{69.75 - 130.25}{\ln\left(\frac{69.75}{130.25}\right)}$$

$$LMTD = 96.62^\circ C$$



El factor de corrección  $F=1$ , cuando existe cambio de fase sin importar la configuración del intercambiador de calor.

$F=1$  Factor de corrección.

$$Q = UFA_s LMTD_{\text{corregido}} \quad (4.51)$$

$$Q = (29.20)(\pi)(0.01892)(0.6)(96.62)$$

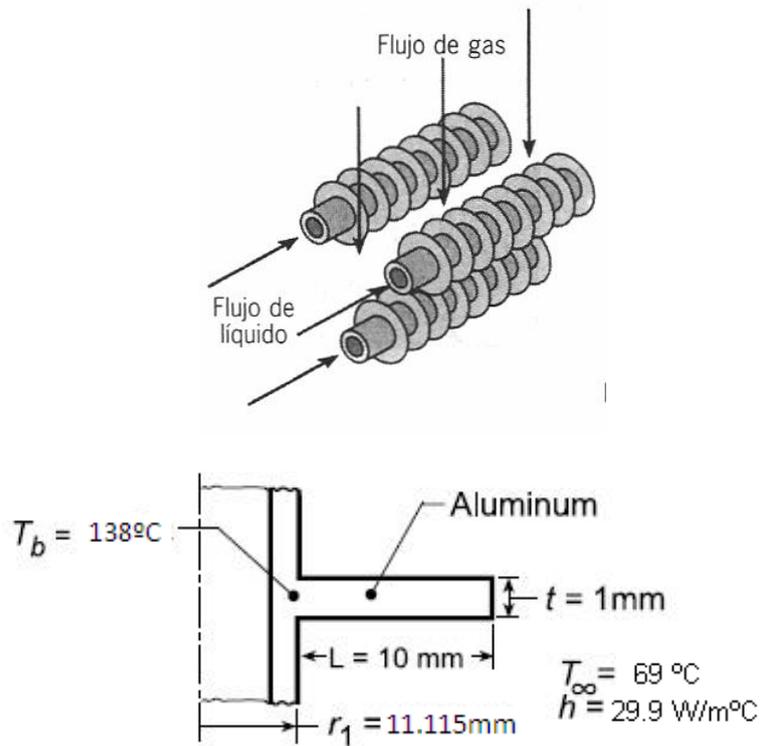
$$Q = 100.4 \text{ W}$$

Se tiene que para un total de 15 tubos y sin aletas un calor de:

$$Q = 1506 \text{ W}$$

#### 4.2.4.4 Intercambiador de calor de tubos con aleta circular.

Las aletas o también denominadas superficies extendidas son usadas ampliamente en aplicaciones de transferencia de calor. Para nuestro caso el material tiene una alta conductividad térmica, rápidamente esta superficie estará aproximadamente a una temperatura uniforme y el calor liberado de la superficie aletada estará gobernado solamente por el fenómeno de transporte de calor entre las superficie y el fluido circundante (Referencia [13] Pg. 389).



**Figura 4.11** Aletas del intercambiador de calor

$$r_{2c} = r_2 + \frac{t}{2} \quad (4.52)$$

Donde:

$r_2$       Radio del tubo mas aleta.      [m]

$t$         Espesor de la aleta.      [m]

$$r_{2c} = (0.011115 + 0.01) + \frac{0.001}{2}$$

$$r_{2c} = 0.02161m$$

$$\frac{r_{2c}}{r_1} = \frac{0.02161}{0.011115} = 1.94$$

$$L_c = L + \frac{E_A}{2} \tag{4.53}$$

Donde:

$L_c$	Longitud característica	[m]
$L_A$	Longitud de la aleta	[m]
$E_A$	Espesor de la aleta	[m]

$$L_c = 0.01 + \frac{0.001}{2}$$

$$L_c = 0.0105m$$

$$A_m = L_c * E_A \tag{4.53}$$

$$A_m = 0.0105 * 0.001$$

$$A_m = 1.05 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$L_c^{\frac{3}{2}} \left( \frac{h}{k_A A_m} \right)^{\frac{1}{2}} = (0.0105)^{\frac{3}{2}} \left( \frac{29.9}{(173)(1.05 \times 10^{-5})} \right)^{\frac{1}{2}} = 0.14 \tag{4.54}$$

$K_A$  Conductividad térmica del aluminio (Anexo 11). [W/m°C]

De las gráficas del Anexo 12 obtenemos el valor correspondiente a la eficiencia:

$$\eta = 0.98$$

$$q_f = \eta q_{\max} \quad (4.55)$$

$$q_f = \eta(2 * \pi * h_a * (r_{2c}^2 - r_1^2)) \Delta T \quad (4.56)$$

$$q_f = (0.95)(2 * \pi * 29.9 * (0.02161^2 - 0.011115^2))(138 - 68.92)$$

$$q_f = 4.35 \text{ W}$$

$$q_{real} = N' q_f + h_a(1 - N' E_A) * 2 * \pi * r_1 * \Delta T \quad (4.57)$$

Donde:

N' Número de aletas por cada tubo

q<sub>f</sub> Calor entregado por cada aleta

$$q_{real} = 140 * 4.37 + 29.9 * (1 - 130(0.001)) * 2 * \pi * 0.011115 * (138 - 68.9)$$

$$q_{real} = 676.8W$$

$$q_{real} = 676.8W * (15 \text{ tubos})$$

$$q_{real} = 10828W$$

Ya que son cuatros bancos de tubos se tendrá un calor total de:

$$q_{TOTAL} = 43312W$$

Superando el Q requerido por cuanto el diseño es satisfactorio.



$$\dot{M} = \frac{43312 * (3600)}{(2731.2 - 581.7) * (1000)}$$

$$\dot{M} = 73 \frac{kg}{h} = 161 \frac{lb}{h}$$

$$Pot = \frac{161 * 1BHP}{34.5}$$

$$Pot = 5BHP$$

Considerando que la temperatura de entrada del agua a la caldera es de 130°F que equivale a 54.4°C. En la línea del gráfico corresponde a la línea de saturación y es el lugar donde el agua empieza a evaporarse, y a es decir hasta ese punto es calor sensible y a partir de ahí pasa a la zona de calor latente, ya que no aumenta la temperatura del agua hasta que ésta se haga completamente vapor. El calor necesario para transferir al agua será: **[31]**

$$\dot{M} = 73 \frac{kg}{h}$$

Temperatura de recirculación del agua =  $T_1 = 54.4 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura de saturación =  $T_2 = 138.25 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$C_p = 4.34 \frac{KJ}{Kg \text{ } ^\circ\text{C}}$$

$$h_{fg} = 2149.5 \frac{KJ}{Kg}$$

$$\Delta T = T_2 - T_1$$

$$\Delta T = 138.25 - 54.4$$

$$\Delta T = 83.85 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Desde luego este proceso tiene dos calores tanto sensible como latente y están definidos por:

$$Q_L = Q_{fg} = \text{calor}_{\text{ latente}}$$

$$Q_S = Q_s = \text{calor}_{\text{ sensible}}$$

$$Q_S = \dot{M} C_p \Delta T \quad (4.60)$$

$$Q_S = (73)(4.34)(83.85)$$

$$Q_S = 26565.4 \frac{\text{KJ}}{\text{h}}$$

$$Q_L = \dot{M} h_{fg} \quad (4.61)$$

$$Q_L = (73)(2149.5)$$

$$Q_L = 156913.5 \frac{\text{KJ}}{\text{h}}$$

$$Q_T = Q_S + Q_L \quad (4.62)$$

$$Q_T = 183479 \frac{\text{KJ}}{\text{h}}$$

$$Q_T = 174021 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

#### 4.2.5.1 Consumo de combustible diesel 2. [32]

**Diesel 2 genera = 150722 KJ/gal**

$$GPH = \frac{Q_T \text{ KJ} / \text{h}}{150722 \text{ KJ} / \text{gal}} \quad (4.63)$$

$$GPH = \frac{183479 \text{ KJ} / h}{150722 \text{ KJ} / gal}$$

$$GPH = 1.2 \text{ gal/h}$$

Considerando adicionalmente una ineficiencia en la combustión que se dan en este tipo de calderos según el fabricante Colombiano Dristal, por lo que adicionaremos un 10% para la generación por lo que tendríamos:

$$GPH = 1.5 \text{ gal/h}$$

#### 4.2.5.2 Consumo de combustible biomasa

Se tomará en cuenta el poder calorífico de la leña para diferentes estados de humedad, en la fábrica puesto que los desechos son obtenidos del producto final, la mayoría de leña se encuentra en un promedio de 16% de humedad.

**Tabla 4.7 Poder calorífico de la leña [29]**

<b>Combustible</b>	<b>Quemado valor calorífico bruto (MJ/kg)</b>	<b>Aprovechable valor calorífico neto (MJ/kg)</b>
Madera al 0% de c.h.	19,8	15,8
Madera 10% de c.h.	17,8	13,9
Madera 20% de c.h.	15,9	12,1
Madera 30% de c.h.	14,5	10,7
Madera 40% de c.h.	12,0	8,6
Madera 50% de c.h.	10,0	6,7
Petróleo combustible pesado	42,6	35,1
Petróleo combustible ligero	43,5	35,9
Butano	49,3	38,9
Propano	50,0	39,4

Se realiza una interpolación para 18 % entre los valores de 10 y 20 % de humedad obteniendo así el valor calorífico de la leña.

$$\dot{m}_L = \frac{Q_T \text{ KJ / h}}{12460 \text{ KJ / Kg}} \quad (4.64)$$

$\dot{m}_L$  Masa de leña requerida por unidad de tiempo [KJ/Kg]

$$\dot{m}_L = \frac{183479 \text{ KJ / h}}{12460 \text{ KJ / kg}}$$

$$\dot{m}_L = 14.72 \text{ Kg/h}$$

Por pérdidas por apertura de compuerta de carga se tiene que considerar un factor de seguridad de 15% según los fabricantes de calderos de biomasa así se obtendrá el valor final requerido de combustible.

$$\dot{m}_L = 14.72 \text{ Kg / h} (1.15)$$

$$\dot{m}_L = 17 \text{ Kg/h}$$

#### 4.2.5.3 Cálculo del flujo de aire necesario [31]

Depende básicamente de la composición y cantidad del combustible: [33]

**Tabla 4.8** Composición química del diesel 2

Elemento	% en Peso
C	86.8
H	12.52
N	0.053
S	0.27

Siendo conveniente recordar las siguientes relaciones:

O<sub>2</sub> en volumen en el aire            20.99

O<sub>2</sub> en peso en el aire                 23.20

Se toma como base 100 lb de combustible para poder determinar cuantas moles se requieren.

**Tabla 4.9** Moles de aire requerido.

<b>Elemento</b>	<b>Moles % en peso</b>	<b>Moles de O<sub>2</sub> Requeridos</b>
C	86.8/12 7.23	7.23
H <sub>2</sub>	12.52/2 6.26	3.13
N <sub>2</sub>	0.053/28 0.0019	0.00095
S	0.27/32 0.0084	0.0084
	<b>Total</b>	<b>10.37</b>

Siendo esta la cantidad de oxígeno requerida para 100 lb de combustible. Pero hay que tomar en cuenta que entre el aire seco para quemar una libra de combustible y el aire húmedo para quemar la misma cantidad de combustible siendo así tenemos:

$M_{ah}$  Moles de aire húmedo.

$M_{as}$  Moles de aire seco.

$W_{ah}$  Aire húmedo para quemar una libra de combustible

$W_{as}$  Aire seco para quemar una libra de combustible.

Siempre teniendo en cuenta que se debe tener un exceso de aire para garantizar que se queme todo el combustible por lo que se recomienda un exceso de aire de 20% y un 85% de eficiencia.

$$M_{as} = Totalmoles * Ea * \frac{Pc}{Ova} \quad (4.65)$$

Donde:

Ea Exceso de aire para la combustión

Pc Peso de combustible [lb]

Ova Oxígeno en volumen de aire

$$M_{as} = 10.37(1.2) \frac{100}{20.99}$$

$$M_{as} = 59.28$$

Siendo esta la cantidad de moles de aire seco requerida para la combustión, pero siempre debido a la humedad relativa existe alguna mezcla húmeda. A una temperatura de 17°C en Riobamba tenemos:

$$M = \frac{0.622P_w}{14.7 - P_w} \quad (4.66)$$

Donde:

M Fracción húmeda presente.

Pw Presión del vapor de agua presente en el aire de Riobamba [lb/in<sup>2</sup>]

$$M = \frac{0.622P_w}{14.7 - P_w}$$

$$M = \frac{0.622(0.17)}{14.7 - (0.17)}$$

$$M = 0.00727$$

$$M_{ah} = \left[ M_{as} + \frac{M_{as}(29 * M)}{18} \right] * Pma \quad (4.67)$$

Pma Peso molecular del aire. lb/lb

El peso molecular del aire para propósitos prácticos siempre es tomado como 29 lb/lb.

$$M_{ah} = \left[ 59.28 + \frac{59.28(29 * 0.00727)}{18} \right] * Pma$$

$$M_{ah} = \left[ 59.28 + \frac{59.28(29 * 0.00727)}{18} \right] * 29$$

$$M_{ah} = 1739 \text{ lba}$$

Puesto que todos los cálculos se los realizó para 100 lb de Diesel, se divide para 100 y así se obtiene para cada libra de combustible.

$$W_{ah} = \frac{1739}{100}$$

$$W_{ah} = 17.39 \text{ lba/lbc}$$

Cantidad de aire en CFM, primero se calculará el aire necesario por hora.

$Q_{as}$  = Flujo másico de aire seco.

$$Q_{as} = W_{ah} * GPH * \rho_c \quad (6.68)$$

$$Q_{as} = 17.39 \frac{\text{lba}}{\text{lbc}} * 1.5 \frac{\text{gal}}{\text{h}} * 7,303 \frac{\text{lb}}{\text{gal}}$$

$$Q_{as} = 190.5 \frac{\text{lba}}{\text{h}}$$

Con la temperatura promedio de 17 °C determinamos el valor del volumen específico siendo éste el inverso de la densidad y así finalmente se obtiene el valor en CFM.

$$\dot{Q}_{as} = Q_{as} * \dot{v} \quad (4.69)$$

$$\dot{Q}_{as} = 190.4 \frac{lba}{h} * 13.34 \frac{ft^3}{lba}$$

$$\dot{Q}_{as} = 190.4 \frac{lba}{h} * 13.34 \frac{ft^3}{lba}$$

$$\dot{Q}_{as} = 2540 \frac{ft^3}{h}$$

$$\dot{Q}_{as} = 43CFM$$

Por último se calcula la cantidad de gases generados por libra de combustible.

$$F_g = Mgc * GPH * \rho_c \quad (4.70)$$

Mgc Masa de gases producidos por el combustible [lbg/lbc]

$$F_g = 18.9 \frac{lbg}{lbc} * 1.5 \frac{gal}{h} * 7.303 \frac{lbc}{gal}$$

$$F_g = 207 \frac{lbg}{h}$$

## Selección del quemador

Es necesario dejar establecido el quemador, para los siguientes cálculos. Con el flujo de aire establecido y consumo de combustible, fácilmente se puede seleccionar en el mercado un quemador.

### 4.2.5.4 Diseño del horno y elementos del caldero [33]

Las ecuaciones de Lobo-Evans es muy común en el diseño final de la sección radiante del horno. El método considera los gases calientes en la cámara de combustión como un cuerpo radiante y los tubos como plano frío de absorción de radiación. El movimiento de los gases alrededor de los tubos se considera en los coeficientes de transmisión de calor por convección.

Con un Q requerido de 174021Btu/h y factor de efectividad  $\alpha=1$ . Los cálculos se basan en datos asumidos para luego mediante un proceso iterativo compararlos y determinar los valores reales.

$$\frac{\sum Q}{\alpha A_{cp}} = (2) \times \text{flujo}_{\text{promedio de gases}} \quad (4.71)$$

$$\frac{\sum Q}{\alpha A_{cp}} = (2)(5000) \text{Btu} / \text{hft}^2$$

$$\frac{\sum Q}{\alpha A_{cp}} = (10000) \text{Btu} / \text{hft}^2$$

Luego de varias iteraciones se afirma un factor de intercambio  $F=0.45$

$$\frac{\sum Q}{\alpha A_{cp} F} = \frac{(10000) \text{ Btu} / \text{hft}^2}{0.45}$$

F Factor de intercambio

$$\frac{\sum Q}{\alpha A_{cp} F} = 22222 \text{ Btu} / \text{hft}^2$$

Según el constructor Colombiano Dristal de calderos la temperatura en el hogar de los hornos se estima entre un rango de 800-850°F, para este caso se tomará el valor menor para proteger nuestro diseño. Con  $\frac{\sum Q}{\alpha A_{cp} F}$  y una temperatura de pared de  $T_{wh}=800^\circ\text{F}$  recomendada por constructores en la figura se determinará el valor de la temperatura en la gráfica de Anexo 13 de los gases producto de la combustión en este caso:

$$T_g = 1400^\circ\text{F}$$

$T_g$  Temperatura de los gases producto de la combustión [°F]

$$Q_F = \frac{174021 \text{ Btu} / \text{h}}{0.75} \quad (4.72)$$

$$Q_F = 232028 \text{ Btu} / \text{h}$$

$Q_F$  Calor liberado en la combustión [Btu/h]

$\dot{m}_F$  Cantidad de combustible requerido [lb/h]

$$\dot{m}_F = \frac{232028 \text{ Btu} / \text{h}}{19574.1 \text{ Btu} / \text{lb}}$$

$$\dot{m}_F = 11.85 \text{ lb} / \text{h}$$

$\dot{m}_{Ar}$  flujo de aire requerido [lba/h]

$$\dot{m}_{Ar} = 11.85 \frac{\text{lb} / \text{h}}{\text{h}} * 17.39 \frac{\text{lba}}{\text{lb} / \text{h}} \quad (4.73)$$

$$\dot{m}_{Ar} = 206 \frac{\text{lba}}{\text{h}}$$

Luego de varias estimaciones e iteraciones se determinó que la tubería apropiada para el diseño según fabricantes y la disposición inmediata en el mercado son tubos de acero sin costura ASTM A192 para calderos de pared gruesa de 1¼ pulgadas y con las dimensiones en Anexo 14.

$$S_t = L * \pi * De \quad (4.74)$$

Donde:

$S_t$  Superficie externa del tubo [ft<sup>2</sup>]

L Longitud de los tubos [ft]

De Diámetro externo de los tubos [ft]

$$S_t = 1.20 \text{ m} * \frac{3.28 \text{ ft}}{1 \text{ m}} * \pi * 1.66 \text{ in} * \frac{1 \text{ ft}}{12 \text{ in}}$$

$$S_t = 1.7 \text{ ft}^2$$

$$Nt = \frac{Q_F}{Fpg * S_t} \quad (4.75)$$

Donde:

$N_t$  Número de tubos

$F_{pg}$  Flujo promedio de gases [Btu/hft<sup>2</sup>]

$$N_t = \frac{232028 \frac{Btu}{h}}{5000 \frac{Btu}{hft^2} * 1.7 ft^2}$$

$$N_t = 26 \text{ Tubos}$$

Cálculo del área de plano frío que se refiere al área que cubren los tubos que componen el intercambiador de calor.

$A_{cp}$  Área de plano frío (tubos). [ft<sup>2</sup>]

$\alpha$  Factor de Efectividad

Por lo tanto el valor del área del plano frío será:

$$\frac{A_{cp}}{Tubo} = D_{cc} * L \quad (4.76)$$

$D_{cc}$  Distancia de centro a centro de cada tubo [in]

$$D_{cc} = 3in$$

$$\frac{A_{cp}}{Tubo} = 3in \frac{1ft}{12in} * 1,20m \frac{3.28ft}{1m}$$

$$\frac{A_{cp}}{Tubo} = 0.98 ft^2$$

Con un  $\alpha = 1$

$$\alpha A_{cp} = 0.98 ft^2 * Nt$$

$$\alpha A_{cp} = 0.98 ft^2 * 25$$

$$\alpha A_{cp} = 24.5 ft^2$$

### Cálculo del área radiante.

En la práctica los diseñadores y constructores de calderos recomiendan una relación de diseño de 5 - 7 ft<sup>2</sup> de Área por cada BHP. Bajo este parámetro se inicia un proceso iterativo hasta obtener el área óptima.

**Tabla 4.10** Dimensiones del hogar y espejos.

	Cantidad	Alto	Largo	Ancho	Superficie (m <sup>2</sup> )
<b>Frontales</b>	2	0.9		0.8	1.44
<b>Laterales</b>	2	0.5	1.6		1.6
<b>Techo</b>	1		1.2	0.8	0.96
				<b>Total</b>	<b>4</b>

$$A_T = 43 ft^2$$

$A_T$  Área de transferencia de calor. [ft<sup>2</sup>]

$A_R$  Área radiante (hogar). [ft<sup>2</sup>]

Con el área total se puede observar que cumple la relación propuesta por los constructores de tal manera que el dimensionamiento del hogar es el adecuado.

$$\frac{A_T}{Pot} = \frac{43 ft^2}{5BHP} = 8.6$$

$$A_R = A_T - \alpha A_{cp} \quad (4.77)$$

$$A_R = 43 - 24.5$$

$$A_R = 18.5 ft^2$$

$$\frac{A_R}{\alpha A_{cp}} = \frac{18.5 ft^2}{24.5 ft^2} = 0.8$$

$$\frac{A_R}{\alpha A_{cp}} = 0.8$$

### Longitud de la trayectoria media

Se encuentra en función de las medidas y la forma del horno. Nuestro diseño se aproxima al primer caso.

Lr Longitud de la trayectoria media (radiación)

**Tabla 4.11** Longitud media de la trayectoria radiante [33]

<b>Hornos rectangulares.</b>	
<u>Dimensiones en orden creciente</u>	<u>Longitud media del rayo radiante</u>
1-1-1 a 1-1-3 1-2-1 a 1-2-4	$\frac{2}{3} \sqrt[3]{Vh}$
1-1-4 a 1-1-∞	1 vez dimensión menor
1-2-5 a 1-2-∞	1.3 veces dimensión menor
1-3-3 a 1-3-∞	1.8 veces dimensión menor
<b>Hornos cilíndricos verticales</b>	
<u>Diámetro/altura</u>	<u>Longitud media del rayo radiante</u>
1-1	2/3 veces el diámetro
1-2 a 1-∞	1 vez el diámetro

$$1.12 \times 2 \times 1$$

Por lo tanto la longitud media de la trayectoria será:

$$L_r = \frac{2}{3} \sqrt[3]{Vh} \quad (4.78)$$

$$L_r = \frac{2}{3} \sqrt[3]{0.9 \times 0.8 \times 1.8}$$

$$L_r = 0.7$$

Con  $L_r$  y las presiones de los gases productos de la combustión adicionalmente con las temperaturas de pared y de los gases se calcula los valores de los calores: **[20]**

$$P_{CO_2} = 0.1084$$

$$P_{H_2O} = 0.1248$$

$$L_r P_{CO_2} = 0.1084 * 0.7 = 0.07$$

$$L_r P_{H_2O} = 0.1248 * 0.7 = 0.08$$

En Anexos 15 y Anexo16 se encuentra las figuras tanto para el H<sub>2</sub>O como para el CO<sub>2</sub>, para calcular el calor debido a la radiación a las distintas temperaturas. Con la longitud media de la trayectoria radiante y las presiones parciales del combustible tenemos:

$$P_{H_2O} L_r = 0.07$$

$$P_{CO_2} L_r = 0.08$$

Con la temperatura de pared  $T_s$  y la temperatura de los Gases  $T_g$ , se procede a la lectura de los valores de los calores radiantes tanto para el  $CO_2$  como para el  $H_2O$ .

$q_c$  Flujo térmico por radiación originado por el  $CO_2$  a  $PCO_2 L_r, T$

$q_w$  Flujo térmico por radiación originado por el  $H_2O$  a  $PH_2O L_r, T$

$q_b$  Flujo térmico  $E_b=1$ .

$$T_{wh} \quad q_{CO_2} = 350 \text{ Btu/h ft}^2$$

$$T_g \quad q_{CO_2} = 1000 \text{ Btu/h ft}^2$$

$$T_{wh} \quad q_{H_2O} = 270 \text{ Btu/h ft}^2$$

$$T_g \quad q_{H_2O} = 900 \text{ Btu/h ft}^2$$

$$T_s \quad q_b = 0.173E_b \left(\frac{T_s}{100}\right)^4 \quad q_b = 709 \text{ Btu/h ft}^2$$

$$T_g \quad q_b = 0.173E_b \left(\frac{T_g}{100}\right)^4 \quad q_b = 6646 \text{ Btu/h ft}^2$$

Con los calores radiantes calculados mediante la siguiente ecuación se obtiene el valor de la emisividad.

$$E = \frac{((q_c + q_w)T_g - (q_c + q_w)T_s)}{((q_b)T_g - (q_b)T_s)} \quad (4.79)$$

$$E = 0.3$$

Con los valores de  $\frac{A_R}{\alpha A_{cp}} = 0.7$  y  $E = 0.3$  según la gráfica en Anexo 17, nos da un factor total de intercambio  $F = 0.43$  por lo que el diseño es satisfactorio con un margen de error del 4.5 % siendo aceptable puesto que este método permite un 6 %.

#### 4.2.5.5 Diseño del intercambiador de calor del caldero

Los intercambiadores recuperan calor entre dos corrientes en un proceso, el intercambiador objeto del diseño, es del tipo tubo y coraza, pero con una particularidad muy especial del lado de la coraza, que si bien es agua, pero no está en movimiento y simplemente está aumentando su energía interna con el calor suministrado por el equipo para obtener vapor saturado a la presión indicada. El proceso de transferencia de calor se realiza por convección entre los dos fluidos y por conducción a través de la pared de los tubos. Se calculará el valor del coeficiente global de transferencia de calor  $U$  para poder comprobarlo con el requerido y su ecuación será.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i \frac{A_i}{A}} + R_i \frac{A_i}{A} + 2.3 \frac{De}{2km} \ln \frac{De}{Di} + R_o + \frac{1}{h_o} \quad (4.80)$$

Con tubería para calderas ASTM A192 sin costura de 1¼ .

De=1.66 in

Di=1.38 in

De	Diámetro exterior de los tubos del intercambiador de calor	[in]
Di	Diámetro interior de los tubos del intercambiador de calor	[in]
Ae	Área exterior de los tubos	[ft <sup>2</sup> ]
Ai	Área interior de los tubos	[ft <sup>2</sup> ]

$$Ae = \pi De Nt Lt$$

$$Ae = \pi \frac{(1.66)}{12} (26)(120)(0.0328)$$

$$Ae = 44.47 \text{ ft}^2$$

$$Ai = \pi Di Nt Lt$$

$$Ai = \pi \frac{(1.38)}{12} (26)(120)(0.0328)$$

$$Ai = 36.97 \text{ ft}^2$$

$$a't = \frac{\pi * (Di)^2}{4} \quad (4.81)$$

$a't$	Área de transferencia	[in <sup>2</sup> ]
-------	-----------------------	--------------------

$$a't = 1.5 \text{ in}^2$$

Con todos estos datos se puede determinar el área de transferencia total

$$at = \frac{Nt * a't}{144 * n} \quad (4.82)$$

Donde:

$at$  Área de transferencia total [ft<sup>2</sup>]

$n$  Número de pasos

$$at = \frac{26 * 1.5in^2 * 1ft^2}{144in^2 * 2}$$

$$at = 0.13ft^2$$

$$\Delta t = LMTD = \frac{((Tg - Tsat) - (Trec - Tsat))}{\ln \frac{(Tg - Tsat)}{(Trec - Tsat)}} \quad (4.83)$$

$Tg$  Temperatura de salida de los gases. [°F]

$Tsat$  Temperatura de saturación. [°F]

$Trec$  Temperatura recomendada para obtener una alta eficiencia [°F]

$$Trec = Tsat + 160°F$$

$$Trec = 280°F + 160°F$$

$$Trec = 420°F$$

$$\Delta t = LMTD = 443°F$$

Cálculo del coeficiente convectivo de los tubos, se realizará con la siguiente expresión.

$$J_H = \left(\frac{h_i D_i}{k}\right) * (c \mu k)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{-0.14} \quad (4.84)$$

Donde:

k Conductividad térmica del gas. [Btu/hft<sup>2</sup>°F]

c Calor específico del gas. [Btu/lb°F]

$\mu$  Viscosidad a la temperatura calórica. [lb/hft]

$\mu_w$  Viscosidad a la temperatura de pared. [lb/hft]

$$\mu = 0.075 \text{ lb} / \text{hpie} \text{ (Anexo 18)}$$

$$\mu_w = 0.067 \text{ lb} / \text{hpie}$$

$$Gt = \frac{Fg}{at} \quad (4.85)$$

$$Gt = \frac{206 \frac{\text{lb}g}{h} * 3.5}{0.13 \text{ ft}^2}$$

$$Gt = 5546.2 \frac{\text{lb}g}{\text{hft}^2}$$

$$\text{Re} = \frac{(D_i)(Gt)}{\mu} \quad (4.86)$$

$$\text{Re} = \frac{(0.115 \text{ ft})(5546.2 \frac{\text{lb}g}{\text{hft}^2})}{0.075 \frac{\text{lb}}{\text{hft}}}$$

$$\text{Re} = 8504$$

$$J_H = 28$$

Una vez obtenido el valor de  $J_H$  en Anexo 19 y reemplazando en la ecuación 4.84 se despeja  $h_i$ :

$$J_H = \left(\frac{h_i Di}{k}\right) * \left(\frac{c\mu}{k}\right)^{-\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{-0.14}$$

$$h_i = \frac{J_H k}{\left(\left(\frac{c\mu}{k}\right)^{-\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{-0.14} Di\right)}$$

Por lo tanto el coeficiente convectivo:

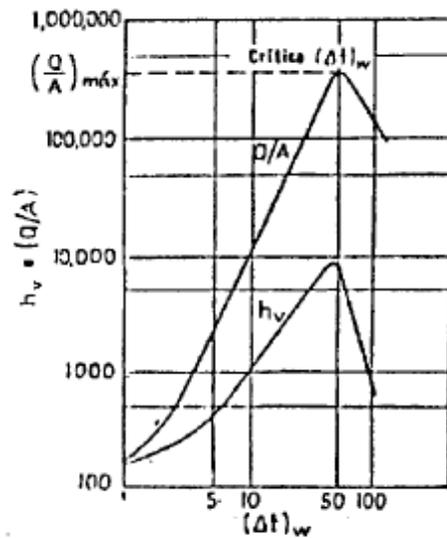
$$h_i = \frac{(28)(0.034)}{\left(\frac{(0.88)(0.075)}{(0.034)}\right)^{-\frac{1}{3}} \left(\frac{0.075}{0.067}\right)^{-0.14} (0.115)}$$

$$h_i = 10.51 \frac{Btu}{hft^2 \circ F}$$

$$h_i = 59.9 \frac{W}{m^2 \circ C}$$

A continuación se realiza el cálculo del coeficiente de convección del lado del agua. En este caso vamos a tener una ebullición y mucho del conocimiento de ebullición se obtiene del trabajo de Jakob y Fritz y las investigaciones posteriores de Jakob. Cuando a través de un banco fluye un vapor de agua y aquel se encuentra sumergido en un recipiente con líquido, se forman pequeñas burbujas de vapor de una manera completamente al azar en la superficie del tubo. El calor que pasa a través de la superficie del tubo donde no se forman burbujas, entra por convección al líquido que lo rodea. Algo de calor del líquido fluye entonces hacia la

burbuja, provocando la evaporación desde su superficie interna hacia el interior de ella misma. Cuando se ha desarrollado suficiente fuerza asensorial entre la burbuja y el líquido, esta se libera, de las fuerzas que la mantiene adherida al tubo y sube a la superficie del recipiente. La temperatura de saturación de la burbuja siendo menor que la del líquido que la rodea, permite el flujo de calor dentro de la burbuja. Estos coeficientes de ebullición típico de la curva de Mc Adams están basados en datos de varios investigadores para el agua.



**Figura 4.12** Curva de ebullición de agua en recipientes cerrados.

$$\frac{Q}{A} = K_s (T_o - T_{sat})^{3.33} P_c^{2.3} f(P_r)^{3.33} \quad (4.87)$$

Donde:

- K<sub>s</sub>    Constante propuesto por Borishanski
- T<sub>o</sub>    Temperatura de pared [°C]
- T<sub>sat</sub>    Temperatura de saturación del fluido [°C]

$P_c$  Presión crítica de cada sustancia en este caso agua [bar]

$P_r$  Presión reducida [bar]

$$P_r = \frac{P}{P_c}$$

**Tabla 4.12** Presión crítica de cada sustancia. [34]

Sustancia	$P_c$ (bar)						
Agua	221,2	R-11	44,1	R-21	51,7	R-113	34,1
Propano	42,6	R-12	41,2	R-22	49,8	R-114	32,6
Amoniaco	112,9	R-13	38,7	R-23	48,4	R-115	31,6
R-142B	41,5	R-152a	45,0	R-216	27,5	R-C318	27,8
R-500	44,3	R-502	40,7	R-505	47,3	R-506	51,6

$$P_r = \frac{3.45\text{bar}}{221.2\text{bar}} = 0.016$$

$$f(P_r) = 1.8(P_r)^{0.17} + 4(P_r)^{1.2} + 10(P_r)^{10}$$

$$f(P_r) = 1.8(0.016)^{0.17} + 4(0.016)^{1.2} + 10(0.016)^{10}$$

$$f(P_r) = 0.91$$

$$K_s = 4.8 \times 10^{-4}$$

$$\frac{Q}{A} = K_s (T_o - T_{sat})^{3.33} P_c^{2.3} f(P_r)^{3.33}$$

$$\frac{Q}{A} = 4.8 \times 10^{-4} (144 - 138.25)^{3.33} 221.1^{2.3} 0.91^{3.33}$$

$$\frac{Q}{A} = 29065.1$$

$$h_{vc} = 0.101 P_c^{0.69} f(P_r) \left(\frac{Q}{A}\right)^{0.7}$$

$$h_{vc} = 0.101(221.2)^{0.69} (0.91)(29065.1)^{0.7}$$

$$h_{vc} = 5063 W / m^2 \circ C$$

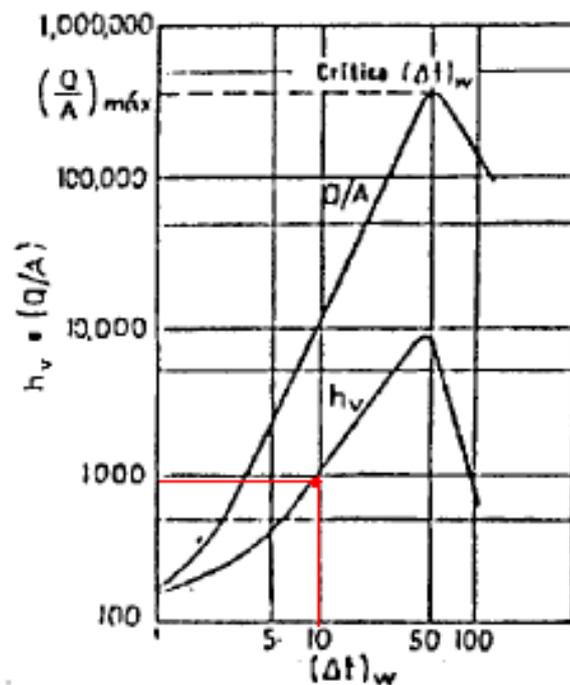
$$h_{vc} = 891 Btu / ft^2 \circ F$$

### Comprobación método gráfico

Las respuestas obtenidas requieren una transformación de unidades puesto que se encuentra en unidades inglesas.

$$h_{vc} = 891 Btu/hft^2$$

$$\Delta t = 10.3 \circ F$$



Comprobación del coeficiente convectivo en función de la tensión superficial, longitud característica y el número de Nusselt, para lo cual Mills A. F. propone lo siguiente: [35]

Datos:

$$C_{pl}=4.278 \text{ KJ/Kg}^\circ\text{C}$$

$$T_w=144 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{sat}=138.25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$h_{fg}=2731.2 \text{ KJ/Kg}$$

$$Pr_l=1.24$$

$$\rho_l = 927.7 \text{ Kg} / \text{m}^3$$

$$\rho_g = 1.9 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$k_l = 0.683 \text{ W} / \text{m}^\circ\text{C}$$

$$Ja = \frac{C_{pl}(T_w - T_{sat})}{h_{fg}}$$

$$Ja = \frac{4.278(144 - 138.25)}{2731.2}$$

$$Ja = 0.011$$

$$Nu = \frac{Ja^2}{Cb^3 Pr_l^m}$$

$$Nu = \frac{(0.011)^2}{(0.013^3)(1.24^2)}$$

$$Nu = 38.76$$

$$Lc = \left[ \frac{\Gamma}{(\rho_l - \rho_g)g} \right]^{1/2}$$

$$Lc = \left[ \frac{0.054}{(927.7 - 1.9)9.81} \right]^{1/2}$$

$$Lc = 0.0024$$

$$h_e = \frac{(38.76)(0.683)}{0.0024}$$

$$h_e = 10853W / m^2 \cdot C$$

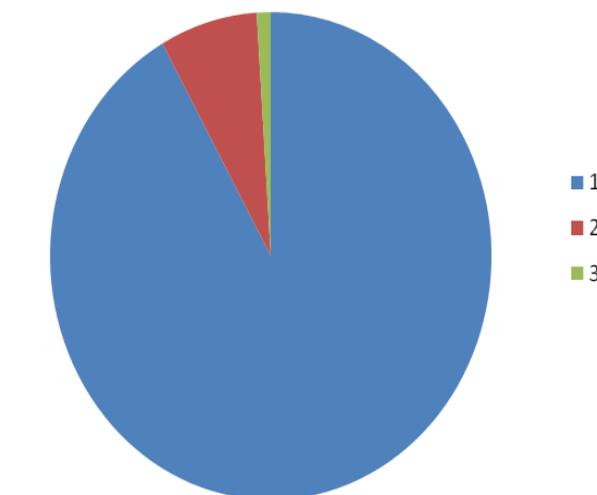
Influencia de las resistencias en porcentaje para el cálculo de los coeficientes convectivos.

$$\sum R = R_1 + R_2 + R_3$$

$$\sum R = 0.0213$$

Donde:

$R_1=1.9 \times 10^{-3}$	Resistencia en la parte interior del tubo.	[°C/W]
$R_2=1.5 \times 10^{-4}$	Resistencia debido al espesor del tubo.	[°C/W]
$R_3=2.1 \times 10^{-5}$	Resistencia en la parte exterior del tubo.	[°C/W]



**Figura.4.13** Porcentaje de influencia de las resistencias

Por lo tanto se procede a calcular el coeficiente global de transferencia de calor:

$$\frac{1}{U} = \left( \frac{1}{hiAi} \right) + Ri \left( \frac{Ai}{Ae} \right) + 2.3 \left( \frac{De}{2km} \right) \ln \left( \frac{De}{Di} \right) + Ro + \left( \frac{1}{he} \right)$$

$$\frac{1}{U} = \left( \frac{1}{10.51(36.97)} \right) + 0.001 \left( \frac{36.97}{44.47} \right) + 2.3 \left( \frac{0.138}{2(52)} \right) \ln \left( \frac{0.138}{0.115} \right) + 0.002 + \left( \frac{1}{891} \right)$$

$$U = 8.51 \text{ Btu/hft}^2\text{°F}$$

El coeficiente de transferencia de calor también puede ser evaluado con la ecuación:

$$U = \frac{Q}{(A)(LMTD)}$$

$$U = \frac{174021 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}}{(43 \text{ ft}^2)(443^\circ \text{F})}$$

$$U = 8.92 \text{ Btu} / \text{hft}^2\text{°F}$$

#### 4.2.6 Diseño Mecánico.

##### Estructura

Una de las herramientas actualmente usadas para el diseño de estructuras metálicas es el programa SAP 2000, el mismo que nos permite ingresar perfiles con diferente sección y materiales con diferentes propiedades. Para la cámara de secado se utilizará aluminio ya que una de sus fortalezas es el de tener alta resistencia a la corrosión. El diseño se basó mediante la norma AA-LRFD 2000

para estructuras en aluminio. En Anexo 20 se encuentra las propiedades de los perfiles seleccionados.

**Tabla 4.13** Perfiles seleccionados para la estructura metálica.

<b>No.</b>	<b>Perfil [plg x mm]</b>	<b>Longitud [m]</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Total [m]</b>	<b>Índice de trabajo</b>
1	□ 4 x 3.2	4.40	5	22	0.80
2	□ 4 x 3.2	4.30	5	21.5	0.80
3	□ 1½ x 1.2	0.93	5	4.65	0.92
4	□ 1½ x 1.2	1.64	5	8.2	0.89
5	□ 1½ x 1.2	1.70	5	8.5	0.89
6	□ 1½ x 1.2	1.98	4	7.92	0.57
7	□ 1½ x 1.2	2.04	4	8.16	0.57
8	□ 1½ x 1.2	4.00	5	20	0.91
9	□ 1½ x 1.2	4.00	5	20	1.00
10	□ 1½ x 1.2	1.82	16	29.12	0.81
11	□ 1½ x 1.2	3.50	4	14	0.68

Pernos de 5/16" - 18 UNC para las juntas.

## ➤ CIMENTACIÓN

Placa base

Aluminio 6063-T5

$$a = b = 0.16 \text{ m}$$

$$e = 9/16 \text{ plg} = 14 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Perno de anclaje

SAE 1

5/16 - 18 UNC

## CARGA MUERTA

### POR CUBIERTA

$$\text{Cubierta} = \frac{\text{Peso..de..plancha}}{\text{Area..de..plancha}} = \frac{14.58 \text{ kg}}{1.62 \text{ m}^2} = 9 \text{ kg} / \text{m}^2$$

$$\text{Área Cubierta} = 30.4 \text{ m}^2$$

### PESO DE PÓRTICOS

$$\text{Carga de pórticos} = (\text{N}^\circ \text{..de..porticos}) \times (\text{Long.}) \times (\text{Peso..de..portico})$$

$$\text{Carga de pórticos} = (5 \text{ porticos}) \times (4 \frac{\text{m}}{\text{portico}}) \times (0.920 \frac{\text{kg}}{\text{m}}) = 18.4 \text{ kg}$$

$$W = 18.4 \text{ kg} / 30.4 \text{ m}^2$$

$$W = 0.6 \text{ Kg} / \text{m}^2$$

### PESO POR SOLDADURA

Se descarta puesto que se utilizan uniones con platinas y pernos

$$\text{Peso total} = (9 + 0.6) \text{ Kg/m}^2 = 9.6 \text{ Kg/m}^2$$

Carga muerta:  $D = 9.6 \text{ Kg/m}^2 \times 1.9 \text{ m} = 18.24 \text{ Kg/m}$

**$D = 18.24 \text{ Kg/m} = 0.18 \text{ kg/cm}$**

## **CARGA VIVA**

### **PERSONAS PARA MONTAJE Y MANTENIMIENTO**

#### **Alternativa:**

Si se necesita 2 trabajadores con un peso promedio de 85Kg para el montaje:

**N<sup>a</sup> Trabajadores:** 2  
**Peso de cada trabajador:** 85 Kg  
**Luz:** 4 m

**$L_r = 0,43 \text{ Kg/cm}$**

## **LLUVIA**

La cubierta es de lámina galvanizada por tanto se descarta esta carga

## **GRANIZO**

La densidad del agua es:

$$\gamma_{H_2O} = 1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

Si tenemos una acumulación de graniza de entre 10 mm

$$S = 1000$$

$$S = 1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \times 0.010 \text{ m} = 10 \text{ kg/m}^2$$

$$S = 10 \times 1.9 = 19 \text{ Kg/m}$$

**$S = 0.19 \text{ Kg/cm}$**

## CENIZA

La densidad de la ceniza es:

$$\gamma_{ceniza} \approx 0.0015213 \frac{Kg}{m^3}$$

Si se tiene una acumulación de 3 mm

$$C \approx 0.0015213 \frac{Kg}{cm^3} \times 0.3cm = 0.0004564 \text{ kg/cm}^2$$

$$C \approx 0.0004564 \frac{Kg}{cm^2} \times 190cm \quad C = 0.09 \text{ kg/cm}$$

Por absorción de humedad + 28%

$$C = 0,11 \text{ kg/cm}$$

$$\text{CARGA VIVA TOTAL} = (0,43 + 0,19 + 0,11) \text{ kg/cm}$$

$$\text{CARGA VIVA TOTAL} = 0.73 \text{ kg/cm}$$

Con las cargas calculadas y establecidas se ingresa al paquete computacional donde se puede apreciar que el diseño es satisfactorio.

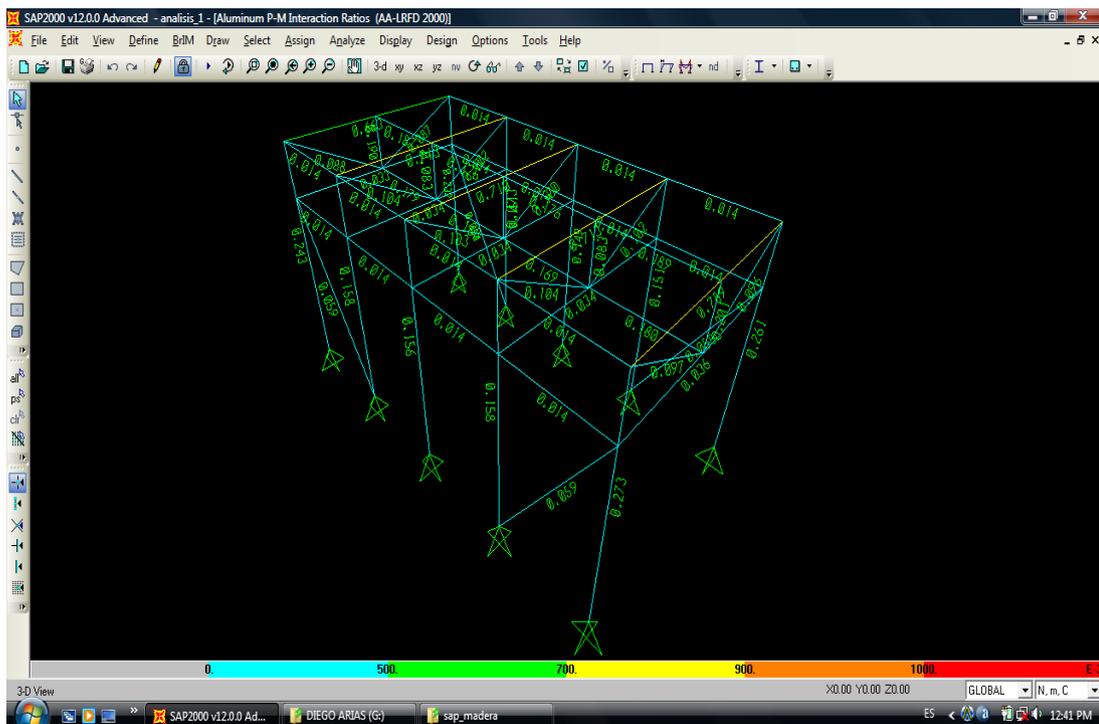


Figura 4.14 Estructura metálica.

### 4.3 Selección de equipos.

#### ➤ **Controlador programable [36]**

El controlador R2500, permite controlar todo el proceso de las secadoras de madera. Este dispositivo se enfoca no sólo, en el proceso de secado, sino también para poder manejar algunas condiciones críticas que puedan suceder. Por otra parte la regulación y la posibilidad al interfaz con los sensores pueden ayudar al ahorro de energía. Es decir que todo lo relacionado con la temperatura, humedad, y otros factores son medidos de acuerdo a un programa preestablecido del secadero de madera según la especie, el espesor, y el contenido de humedad de la madera.

Marca	CET R2500
Voltaje de trabajo	100-240 VAC
Cantidad	1



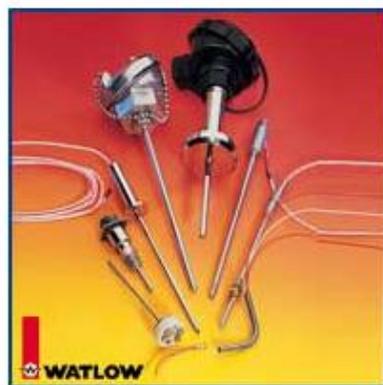
**Figura 4.15** Controlador programable

#### ➤ **Rtd [37]**

Como su nombre lo indica, son sensores que se usan para medir la temperatura mediante la correlación de la resistencia del elemento RTD con la temperatura. La mayoría de los elementos consisten de un pedazo de alambre enrollado bien envuelto alrededor de un núcleo de cerámica o de vidrio. El elemento suele ser

bastante frágil, por lo que a menudo se coloca una sonda en el interior forrado para protegerlo. El elemento de IDT se hace de un material puro cuya resistencia a diferentes temperaturas se ha documentado. El material tiene un cambio predecible en la resistencia como los cambios de temperatura, es previsible que este cambio se utiliza para determinar la temperatura. Estos sensores envía su señal al controlador programable y el mismo indica mediante alarmas el descenso o exceso de temperatura

Marca	WATLOW - GORDON
Diámetro	3/16"
Largo	6"
Cantidad	2



**Figura 4.16** Rtd controlador de temperatura.

➤ **Solenoides 3/2 [38]**

Válvula que recibe la señal enviada por el controlador programable, a la vez ésta acciona el pistón de simple efecto el mismo que mueve el mecanismo para la apertura o cierre de las ventilas. Su funcionamiento es neumático y depende básicamente de la humedad relativa y temperatura de la cámara de secado..

Marca	GENEBRE
<i>Diámetro</i>	<i>1/4"</i>
Fluido	Aire
Cantidad	1



**Figura 4.17** Válvula solenoide para aire

➤ **Solenoid NC [38]**

Según las condiciones internas de la cámara de secado y la señal enviada por el controlador programable, la válvula solenoide permite o restringe el flujo de vapor tanto para la humectación como para el sistema de calefacción.

Marca	GENEBRE
Diámetro	1/2"
Fluido	Vapor
Cantidad	1



**Figura 4.18** Válvula solenoide para vapor.

➤ **Válvula operacional [38]**

Marca	GENEBRE
Diámetro	2 1/2"
Cantidad	1



**Figura 4.19** Válvula operacional.

➤ **Pistón de simple efecto [38]**

Marca	GENEBRE
Modelo	G/2
Presión	6 bares
Cantidad	4



**Figura 4.20** Pistón de simple efecto

➤ **Temporizador [39]**

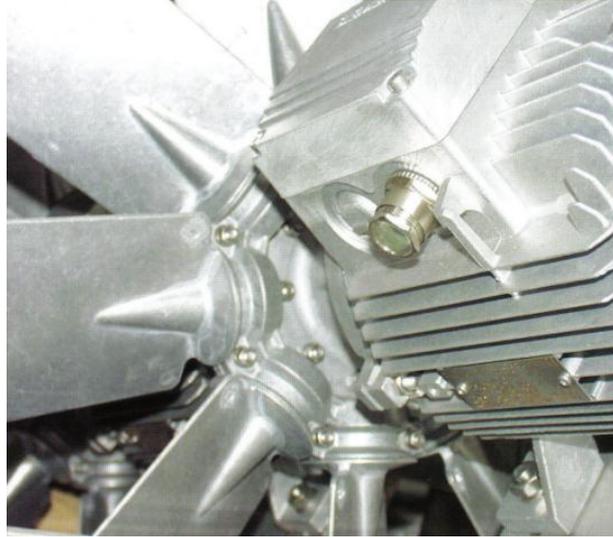
Marca	AUTONICS
Voltaje de trabajo	100-240 VAC
Frecuencia	60 Hz
Cantidad	1
Rango	0.01 segundos a 9990 horas



**Figura 4.21** Temporizador.

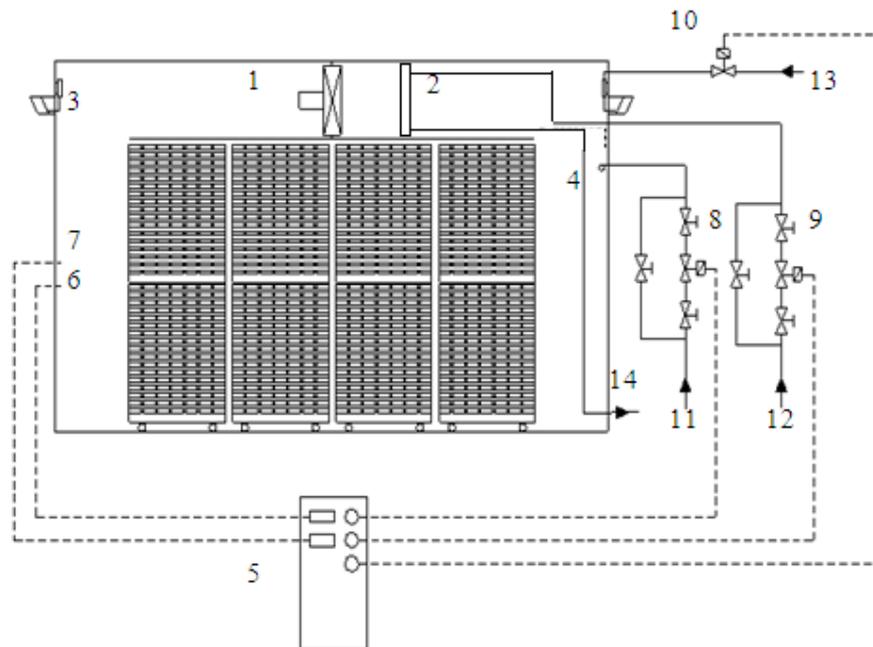
➤ **Ventiladores [40]**

Marca	SOLER & PALAU
Material	Fundición de Aluminio y silicio
Potencia	1.1 KW
Cantidad	4
CFM	10000 m <sup>3</sup> /h
RPM	1430 rpm



**Figura 4.22** Ventiladores blindados.

#### 4.4 Diagrama de control.



**Figura 4.23** Diagrama de control del secadero

- 1 Ventilador
- 2 Intercambiador de calor
- 3 Ventilas
- 4 Inyector de vapor
- 5 Controlador
- 6 RTD Bulbo seco
- 7 RTD Bulbo húmedo
- 8 Electroválvula del inyector de vapor
- 9 Electroválvula del intercambiador de calor
- 10 Electroválvula de los actuadores de las ventilas
- 11 Alimentación de vapor al inyector
- 12 Alimentación de vapor al intercambiador
- 13 Alimentación de aire a los actuadores de las ventilas
- 14 Retorno de condensado

## CAPÍTULO V

### 5. ESTUDIO DE COSTOS

#### 5.1 COSTOS DIRECTOS

Son aquellos que están involucrados en la transformación de los materiales y se los puede identificar directamente con el producto, principalmente son:

- Materiales directos.
- Mano de obra directa.

Al rubro de materiales directos se lo subdividió en:

- Elementos de la estructura y paneles.
- Cimentación y piso.
- Equipos y accesorios.

**Tabla 5.1** Elementos de la estructura y paneles.

Item	Descripción	Uni.	Cant.	V. Unitario	Sub. Total
1	Perfil de aluminio 4 x 3.2 [6.4m]	m	43.5	7.5	326.25
2	Perfil de aluminio 1 1/2 x 1.2 [6.4m]	m	120.6	5.3	639.2
3	Pernos 5/16 – 18 UNC	u	300.0	0.17	51
4	<i>Pernos 7/16 – 14 UNC</i>	u	60.0	0.34	20.4
5	Lana de vidrio	m <sup>2</sup>	130.2	4.26	554.6
6	Paneles modulares lámina galvanizada. (1.80x0.9)m	m <sup>2</sup>	321.2	7.68	2466.2
7	Paneles modulares lámina galvanizada (Techo Falso)	m <sup>2</sup>	30.4	7.68	233.5
				<b>Total</b>	<b>3826</b>

**Tabla 5.2 Equipos y accesorios**

Item	Descripción	Uni.	Cant.	V. Uni.	Sub. Total
1	Intercambiadores de calor de cobre y aletas de aluminio.	U	4	314.8	1259.2
2	Pistón de simple efecto modelo G/2, presión 6 bares.	U	4	210	840
3	Válvula operacional de simple efecto de 2 ½"	U	1	650	650
4	Motores para alta temperatura 165 °C, 220 – 460 / 3 / 60 Hz. Con ventiladores de aluminio.	U	4	920	3680
5	Solenoides para vapor de ½, normalmente cerrada.	U	1	125	125
6	Solenoides operacionales de 3 vías de ¼	U	4	46	184
7	Trampas de vapor de balde invertido, ¾ NPT.	U	5	117	585
8	Controlador programable Watlow, serie F4.	U	1	318.5	318.5
9	Rtd Watlow – Gordon, diámetro 3/16"	U	2	88.75	177.5
10	Temporizador digital, 100 – 240 VAC, rango 0.01 seg. a 9990 horas.	U	1	210	210
11	Materiales (Hormigón armado con una resistencia de 200Kg/cm <sup>2</sup> )	m <sup>3</sup>	17	80.64	1371
12	Caldero para biomasa y diesel de 5BHP	U	1	5300	5300
				<b>TOTAL</b>	<b>14700</b>

**Tabla 5.3 Máquinas y Herramientas.**

Item	Descripción	Horas/Equipo	Costo/Hora	Sub. Total
1	Soldadora	40	5	200
2	Torno	4	8	32
3	Moladora	8	5	40
4	Taladro	8	5	40
			<b>TOTAL</b>	<b>312</b>

**Tabla 5.4 Materiales consumibles**

Item	Descripción	Uni.	Cant.	V. Uni.	V. Total
1	Electrodos de aluminio y estaño	Kg	30	19	570
2	Cuchilla de torno	u.	1	12	12
3	Sierra	u.	2	4	8
4	Brocas	u.	2	1.5	3
				<b>TOTAL</b>	<b>593</b>

**Tabla 5.5 Mano de obra directa.**

Item	Descripción	Hora-Hombre	Sal. Real/Hora	Sub. Total
1	Mecánico	15	15	225
1	Soldador	40	10	400
3	Electricista	10	20	200
4	Ayudante	15	8	120
5	Mano de obra	15	160	320
			<b>TOTAL</b>	<b>1265</b>

**Tabla 5.6** Resumen de costos directos

<b>Item</b>	<b>Descripción</b>	<b>V. Total</b>
1	Elementos de la estructura y paneles	3826
2	Equipos y accesorios	14700
3	Máquinas y herramientas	312
4	Materiales consumibles	593
5	Transporte	250
6	Mano de obra directa	775
<b>TOTAL</b>		<b>20456</b>

## 5.2 COSTOS INDIRECTOS

Se los conoce de esta manera debido a que no se los puede identificar de manera directa con el producto. Se los conoce también como costos de fabricación, entre estos encontramos:

- Insumos.
- Otros.

Los costos de los insumos se considera un 1.5% del costo total de la obra.

**Tabla 5.7** Insumos.

<b>Item</b>	<b>Descripción</b>	<b>Uni.</b>	<b>Cant.</b>	<b>V. Total</b>	
1	Energía eléctrica, agua, teléfono	%	1.5	20456	306.84
<b>TOTAL</b>				<b>306.84</b>	

**Tabla 5.8** Otros

Item	Descripción	Total
1	Dirección técnica	800
<b>TOTAL</b>		<b>800</b>

**Tabla 5.9** Resumen de costos indirectos

Item	Descripción	V. Total
1	Insumos	306.84
2	Otros	800
<b>TOTAL</b>		<b>1106.84</b>

### 5.3 COSTO TOTAL APROXIMADO DEL PROYECTO

Para obtener el costo total aproximado del proyecto se suman los valores obtenidos tanto en costos directos, como en costos indirectos, también se considera un valor correspondiente a imprevistos que es igual al 5% del costo total.

**Tabla 5.10** Costo total del proyecto.

Item	Descripción	V. Total
1	Costos directos	20456
2	Costos indirectos	1106.84
3	Imprevistos	1078.1
4	Utilidad	0
<b>TOTAL</b>		<b>22641</b>

## 5.4 ANÁLISIS DE COSTOS DE SECADO POR METRO CÚBICO DE MADERA

### 5.4.1 Depreciación sobre la inversión en el secadero. [25]

$$D_i = \frac{IT \cdot F_1}{V_m \cdot 100} \quad (5.1)$$

IT	Inversión total, que involucra el costo total del secadero	[dólares]
F <sub>1</sub>	Porcentaje anual de depreciación de la inversión, que se estima en un período de 8 años.	[%/año]
V <sub>m</sub>	Volumen de madera a secar por año	[m <sup>3</sup> /año]

$$D_i = \frac{(22641)(12.5)}{(194.4)(100)}$$

$$D_i = 14.55 \text{ dólares/m}^3$$

### 5.4.2 Interés sobre la inversión:

$$I_i = \frac{IT \cdot i}{V_m \cdot 100} \quad (5.2)$$

i	Tasa anual de interés	[%/año]
---	-----------------------	---------

$$I_i = \frac{(22641)(11.19)}{194.4 \times 100}$$

$$li = 13.03 \text{ dólares/m}^3$$

#### 5.4.3 Interés sobre el costo del terreno ocupado por el secadero:

$$It = \frac{As.K_1.i}{V_m.100} \quad (5.3)$$

As	Área requerida para el secador y el apilado de madera	[m <sup>2</sup> ]
K <sub>1</sub>	Costo del terreno.	[dólares /m <sup>2</sup> ]

$$It = \frac{(50)(38)(11.19)}{194.4 \times 100}$$

$$It = 1.10 \text{ dólares/m}^3$$

#### 5.4.4 Costo de la energía consumida por los ventiladores:

$$Ce = \frac{24.N_w.T_s.P_e}{V_s.100} \quad (5.4)$$

N <sub>w</sub>	Potencia requerida por los ventiladores durante el secado	[Kw]
T <sub>s</sub>	Tiempo de secado	[días]
P <sub>e</sub>	Costo de la energía	[dólares/Kw-h]

Vs Capacidad del secadero [m<sup>3</sup>]

$$C_e = \frac{(24)(10.444)(4.8)(0.14)}{(4.05)(100)}$$

$$C_e = 0.4 \text{ dólares /m}^3$$

#### 5.4.5 Costo de la mano de obra durante el apilado:

Utilizando dos personas para apilar la madera

$$C_{m_o} = \frac{T_a L}{60} \quad (5.5)$$

Ta Tiempo de apilado [min/m<sup>3</sup>]

L Costo de la mano de obra [dólares /h]

$$C_{m_o} = \frac{(30)(7.5)}{60}$$

$$C_{m_o} = 3.75 \text{ dólares/m}^3$$

#### 5.4.6 Costo de la mano de obra durante la descarga:

$$C_{m_d} = \frac{T_d L}{60} \quad (5.6)$$

Td Tiempo de descarga [min/m<sup>3</sup>]

$$C_{m_d} = \frac{(30)(7.5)}{60}$$

$$C_{m_d} = 3.75 \text{ dólares/m}^3$$

#### 5.4.7 Valor de las pérdidas de madera durante el secado:

$$V_p = \frac{P_m \cdot P_w}{60} \quad (5.7)$$

P<sub>m</sub> Precio de la madera antes del apilado [dólares/m<sup>3</sup>]

P<sub>w</sub> Porcentaje estimado de pérdidas de madera [%]

$$V_p = \frac{1350 \times 0.05}{60}$$

$$V_p = 1.13 \text{ dólares / m}^3$$

#### 5.4.8 Costo total del secado al horno:

$$C_{T_s} = D_i + l_i + l_t + C_e + C_{m_o} + C_{m_d} + V_p \quad (5.8)$$

$$C_{T_s} = 37.71 \text{ dólares / m}^3$$

## CAPÍTULO VI

### 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1 Conclusiones

- La madera requiere de un tratamiento previo para combatir agentes biológicos y garantizar el producto final. Los preservantes deben ser seleccionados bajo un criterio económico y de buenos resultados con las características descritas en el capítulo II.
- Bajo los parámetros analizados en el capítulo III, se puede determinar que la mejor alternativa es el secador convectivo, por costos, por facilidades de instalación y sobre todo por la calidad de secado además por los requerimientos de la empresa en cuanto a la capacidad de rotación de la materia prima.
- En los cálculos térmicos no se considera un calor necesario para el calentamiento inicial de las instalaciones, puesto que su valor es relativamente bajo en comparación con el resto de la energía requerida. Además la instalación adquiere el equilibrio térmico en muy poco tiempo.
- El valor de pérdidas energéticas en las paredes de la cámara de secado es de 1586.7 W y el calor obtenido en el diseño para el proceso de secado es de 43312 W, es decir que la eficiencia del secadero es aceptable, puesto

que obtenemos una relación pérdidas – producción energética del 4 %, confirmando así una correcta selección del espesor del aislante térmico.

- Del análisis de costos se puede apreciar que es bajo el costo de secado en la cámara, puesto que el combustible a utilizar es desechos de la propia planta, sin embargo el consumo de Diesel 2 es bajo, de tal manera que se estima una pronta recuperación de la inversión.
- Los tipos de madera que se procesa en la empresa son chanul, mascarey, laurel, guayacán, caoba, eucalipto, pero para los cálculos se seleccionó el eucalipto puesto que brinda una gran complejidad a la hora de secar por poseer una humedad inicial de 89.6 % en relación al 80 % promedio de las otras especies. Esta selección nos asegura el perfecto funcionamiento para las otras maderas.
- Las calderas, como dispositivos para generar vapor, tienen grandes aplicaciones industriales, van desde generación de potencia, evaporación, aplicaciones en hospitales, hoteles e industrias textiles, concentración de soluciones a través de la evaporación, etc.
- Se ha realizado el diseño de un caldero, para combustibles líquidos y sólidos obteniendo de esta manera una producción de vapor con costos de combustibles muy bajos y como futuros emprendedores fomentar una cultura ambientalista debido al grave daño ocasionado por el uso excesivo de combustibles derivados del petróleo.

- Se puede observar la ventaja que brinda el implementar aletas a lo que finalmente brinda una mayor área de transferencia de calor lo que deriva en un incremento en la eficiencia del intercambiador de calor.
- Al presentar finalmente este proyecto de tesis, se da constancia de que los estudiantes de la escuela de Ingeniería Mecánica, se encuentran capacitados para desarrollar tecnologías en iguales o mejores condiciones dejando a un lado la dependencia extranjera.

## 6.2 **Recomendaciones**

- La utilización de paquetes computacionales como Microsoft Excel, son herramientas de gran ayuda puesto que la mayoría de cálculos fueron realizados mediante procesos iterativos para obtener un refinamiento de variables.
- Se recomienda realizar un mantenimiento preventivo en los motores de los ventiladores puesto que por estar sometido a un ambiente altamente corrosivo estos pueden deteriorarse y disminuir su vida útil notablemente. El blindaje presta una protección sin embargo siempre es necesario realizar mantenimientos periódicos.

- El caldero debe tener una limpieza completa cada cierto número de secados, para así evitar incrustaciones en la parte interior y exterior de los tubos, realizando dicho mantenimiento evitaremos que la eficiencia del caldero disminuya. Para la limpieza interior de los tubos utilizar cepillos de acero y terminar con aire comprimido. Para la parte exterior de los tubos utilizar agua a presión.
  
- Una caldera con un mantenimiento adecuado puede llegar a operar por 20 años o más. Mantener la acidez del agua dentro de un rango de 9.0-11.5. Lo que puede ocurrir y es muy frecuente, es que el operador no cuente con un laboratorio de análisis químico de respaldo o no este capacitado adecuadamente para comprender que efectos tiene cada uno de los componentes químicos que acompañan el agua y no se implemente el tratamiento adecuado.
  
- Trabajar con un plan de secado suave para evitar deformaciones en la madera, debemos siempre obtener la mayor eficiencia posible, es decir evitar al máximo tensiones en los tablones.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **ORTÍZ M.** Manual de preservación de la madera SECAP. 1982 pp. 4-62.
- [2] [www.laesferaverde.cl/ar\\_lm.htm](http://www.laesferaverde.cl/ar_lm.htm)
- [3] **MORA N.** Conceptos Básicos y bases físicas para el secado de madera.  
1ra. ed. México. 1989. Pp. 17-48
- [4] **SAAVEDRA A.** Secado de la madera de eucalipto blanco. 3ra. ed.  
México 1991. Pp. 2-10
- [5] **Calderón A.** Acidez en maderas y cortezas. 1ra. ed. México. 2006. pp.  
1-6
- [6] [www.redmadera.cl/explora/libro/explora\\_madera..](http://www.redmadera.cl/explora/libro/explora_madera..)
- [7] **PADT-REFORT.** Manual de diseño para maderas del grupo andino. 3ra.  
ed. Lima. 1982. Pp 1-24
- [8] [www.educacionforestal.org/Documentos/Preservacionmadera.pdf](http://www.educacionforestal.org/Documentos/Preservacionmadera.pdf)
- [9] **CIURLO F.** Revista mm- madera. 1ra. ed. Costa Rica. 2008. Pp. 1-6
- [10] [www.monografias.com/secadodemadera](http://www.monografias.com/secadodemadera)
- [11] **NUTSCH W.** Tecnología de la madera y del mueble. Pg. 73
- [12] [www.ingenieria.uady.mx/revista/volumen6/losdefectos](http://www.ingenieria.uady.mx/revista/volumen6/losdefectos)
- [13] [www.conicyt.cl/fondef/bases/fondef/PROYECTO/98/I/D98I1071](http://www.conicyt.cl/fondef/bases/fondef/PROYECTO/98/I/D98I1071)
- [14] **APPEL J.** Manual secado de madera. 2da. Ed. México. 1986. Pp. 1-68
- [15] **VALENTINO A.** Secado de madera en cámara basado en radiación de  
ultrasonido de potencia Copyright Lima, 1989. Pp. 85-92
- [16] **CAMPOS D, VITERI H:** Diseño para secadores de madera. Tesis de grado,  
Ingeniería Mecánica, ESPOCH, Riobamba, Ecuador, 1997. Pp. 23-94

- [17] **HURTADO G** Tecnología del secado de la madera para exportación en el Ecuador. Tesis de grado, Ingeniería Mecánica, ESPOCH, Riobamba, Ecuador, 2000. Pp. 49-128
- [18] **MELO R.** Madera. Santiago de Chile. Programa Nacional de apoyo a la pequeña y mediana industria. 1993. Pp. 34-85
- [19] **HOLMAN J.P.** Transferencia de calor. 9na. ed. México Compañía editorial Continental. S.A. 1993. Pp. 22-318
- [20] **VALENZUELA R.** Apuntes de transferencia de calor. Riobamba 2004. pp. 9-88
- [21] **KARLEKAR B.V.** Transferencia de Calor. México. Editorial Intermamericana. 1985 Pp. 103-477
- [22] **GRIMM N.** Manual de diseño calefacción y ventilación. Volumen I. España. Mc Graw-Hill. 1996 Pp. 18.1-34.5
- [23] **PREDAFORT.** Secado de la madera II. Lima. 1987. Pp. 13-53
- [24] [www.monografias.com/secadores/madera/cam\\_in](http://www.monografias.com/secadores/madera/cam_in)
- [25] Manual de Diseño para maderas del Grupo Andino Junta del Acuerdo de Cartagena. 3ra. ed. Lima. 1982 Pp. 3-27
- [26] **JUNAC.** Atlas de maderas tropicales. 1ra. ed. 1989 México Pp. 78
- [27] **CUEVAS E.** Secado de la madera. 1ra ed. 2005 Chile Pp. 65-192
- [28] Proyecto Promadera. Manual de secado de madera. 2da. ed. Madrid. Pp. 59-67
- [29] Documentos FAO. Conservación de Energía en las industrias mecánicas forestales
- [30] **MONTENEGRO J.** Diseño de un secador de madera. 1ra. ed. México. 1993 Pp. 98-132

- [31] **KOHAN** A. Manual de calderos. Volumen I. España. McGraw-Hill 2000. pp. 55-163
- [32] [www.petroecuador.com.ec/idc/groups/public/documents](http://www.petroecuador.com.ec/idc/groups/public/documents)
- [33] **KERN** D. Procesos de transferencia de calor. 1ra.ed. México 1974 Pag.798.
- [34] Diseño de equipos térmicos. Universidad de Catalunya Pg. 5
- [35] **MILLS** A. F. Transferencia de calor. 1ra. ed. España. McGraw-Hill. 1995. Pg. 666-702
- [36] <http://www.ingenierialpl.com.ar/maderas.htm>
- [37] [http://www.watlow.com/products/sensors/se\\_rtd.cfm](http://www.watlow.com/products/sensors/se_rtd.cfm)
- [38] <http://www.genebre.es>
- [39] [www.autonics.com/sensors&controllers/detail](http://www.autonics.com/sensors&controllers/detail)
- [40] <http://global.solerpalau.com/product.jsp?PRODUCTID=182&CATEGORY>

## BIBLIOGRAFÍA

- PADT-REFORT.** Manual de Diseño para Madera del Grupo Andino. 3ra. ed.  
Lima: Junta del Acuerdo de Cartagena, 1982.
- HOLMAN, J.P.** Transferencia de Calor. 9na.ed. México: Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V,1998.
- VALENZUELA,M.R.** Apuntes de Transferencia de Calor. Riobamba: Centro de Producción Digital-ESPOCH, 2003.
- NILS,R.G.** Manual de Diseño de Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado. 1era.ed España: McGraw-Hill Interamericana de España, S.A., 1996.
- KARLEKAR, B.V.** Transferencia de calor. Edit. Interamericana. 1985.
- HOWELL, J.R.** Fundamentos de Ingeniería Termodinámica. McGraw-Hill,1987.
- ZEMANSKY, M.W.** Calor y Termodinámica. McGraw-Hill. 1984.
- CHAPMAN, A.J.** Transferencia de Calor. MacMillan. Ed. Bellisco, 1990.
- INCROPERA, F.P.** Fundamentos de transferencia de calor. 4ta.ed. México:1990.
- MEGYESY E.** Manual de recipientes a presión. México Limusa, 1995
- KOHAN A.** Manual de calderos. Volumen I. España. McGraw-Hill 2000
- KERN D.** Procesos de transferencia de calor. 1ra.ed. México 1974
- MILLS A.F.** Transferencia de calor. 1ra. ed. España. McGraw-Hill. 1995.
- CAMPOS D, VITERI H:** Diseño para secadores de madera. Tesis de grado, Ingeniería Mecánica, ESPOCH, Riobamba, Ecuador, 1997.
- MELO R.** Madera. Santiago de Chile. Programa Nacional de apoyo a la pequeña y mediana industria. 1993.
- JUNAC.** Manual del Grupo Andino para el secado de maderas Copyright Lima, 1989.

**ORTIZ M.** Manual de preservación de la madera SECAP. 1982

## LINKOGRAFÍA

### **EL CAMBIUN**

[http://www.laesferaverde.cl/ar\\_lm.htm](http://www.laesferaverde.cl/ar_lm.htm)

2008-10-06

### **EFFECTOS DE LOS HONGOS EN LA MADERA**

[www.redmadera.cl/explora/libro/explora\\_madera](http://www.redmadera.cl/explora/libro/explora_madera).

2008-10-17

### **PRESERVANTES HIDROSOLUBLES (INORGÁNICOS)**

[www.educacionforestal.org/Documentos/Preservacionmadera.pdf](http://www.educacionforestal.org/Documentos/Preservacionmadera.pdf)

2008-10-17

### **PRESERVANTES ERRADICANTES**

[www.educacionforestal.org/Documentos/Preservacionmadera.pdf](http://www.educacionforestal.org/Documentos/Preservacionmadera.pdf)

2008-10-18

### **ESPESOR DE LOS SEPARADORES**

[www.monografias.com/secadodemadera](http://www.monografias.com/secadodemadera)

2008-11-01

### **RAJADURAS SUPERFICIALES**

[www.ingenieria.uady.mx/revista/volumen6/losdefectos](http://www.ingenieria.uady.mx/revista/volumen6/losdefectos)

2008-11-01

### **MANCHA AZUL**

[www.conicyt.cl/fondef/bases/fondef/PROYECTO/98/I/D9811071](http://www.conicyt.cl/fondef/bases/fondef/PROYECTO/98/I/D9811071)

2008-11-02

## **CONDICIONES CLIMÁTICAS DE RIOBAMBA**

[www.tiempoyhora.com/riobamba,ecuador](http://www.tiempoyhora.com/riobamba,ecuador)

2009-03-01

## **CAIDA DE PRESIÓN EN EL INTERIOR DE LA CÁMARA DE SECADO**

[www.monografias.com/secadores/madera/cam\\_in](http://www.monografias.com/secadores/madera/cam_in)

2009-04-18

## **DETERMINACIÓN DE ENTALPÍAS**

<http://www.monografias.com/trabajos17/calorimetria/calorimetria.shtml>

2009-12-10

## **CARACTERÍSTICAS DEL DIESEL 2**

[www.petroecuador.com.ec/idc/groups/public/documents](http://www.petroecuador.com.ec/idc/groups/public/documents)

2010-01-04

## **COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL DIESEL 2**

[www.petrocomercial.com/wps/documentos/Productos\\_Servicios/productos\\_limpios/Productos\\_Diesel2](http://www.petrocomercial.com/wps/documentos/Productos_Servicios/productos_limpios/Productos_Diesel2)

2010-01-04

## **MOLES DE AIRE REQUERIDO PARA LA COMBUSTIÓN**

[www.fisicanet.com.ar/quimica/procesos/tb01\\_procesos\\_combustion.php](http://www.fisicanet.com.ar/quimica/procesos/tb01_procesos_combustion.php)

## **CURVA DE EBULLICIÓN DEL AGUA**

[www.monografias.com/trabajos56/precalentamiento-agua/precalentamiento-agua2.shtml](http://www.monografias.com/trabajos56/precalentamiento-agua/precalentamiento-agua2.shtml)

2010-01-30

## **CONTROLADOR PROGRAMABLE**

<http://www.ingenierialpl.com.ar/maderas.htm>

2010-02-08

## **RTD TEMPERATURA**

[http://www.watlow.com/products/sensors/se\\_rtd.cfm](http://www.watlow.com/products/sensors/se_rtd.cfm)

2010-02-08

## **VÁLVULAS SOLENOIDES**

<http://www.genebre.es>

2010-02-08

## **TEMPORIZADOR**

[www.autonics.com/sensors&controllers/detail](http://www.autonics.com/sensors&controllers/detail)

2010-02-08

## **VENTILADORES**

<http://global.solerpalau.com/product.jsp?PRODUCTID182&CATEGORY>

2010-02-08