

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**



**"DISEÑO DE UN HORNO TIPO BACH PARA
SECAR MADERA"**

TESIS

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO MECÁNICO

JUAN TIMOTEO SEDANO FLORES

PROMOCIÓN: 1973-I

LIMA - PERÚ

2006

INDICE

PROLOGO	1
1.0 INTRODUCCIÓN	4
1.1 Objetivo	4
1.2 Planteamiento del problema	4
1.3 Antecedentes	5
1.4 Importancia y oportunidad del tema	6
1.5 limitaciones	7
2.0 SECADO DE MADERA	8
2.1 Características de la madera	8
2.1.1 Estructura del tronco del árbol	8
2.1.1.1 Partes principales	8
a) La corteza	10
b) El cambium	10
c) La madera o xilema	10
2.1.1.2 Planos de la madera	11
2.1.1.3 Estructura macroscópica	11
2.1.1.4 Estructura microscópica	11
2.1.2 Composición química de la madera	15
2.1.3 Humedad de la madera	15
2.1.3.1 Contenido de agua	15
2.1.3.2 Definición	17

2.1.3.3	Contenido de humedad	17
2.1.3.4	Métodos de determinación	18
2.1.3.5	Efectos	20
2.1.4	Relación entre humedad y secado	20
2.1.4.1	Parámetros que influyen	20
2.1.4.2	Humedad de equilibrio	20
2.2	Secado	25
2.2.1	Presecado	26
2.2.2	Secado	26
2.3	Métodos	27
2.3.1	En el medio ambiente	27
2.3.2	En hornos	27
2.3.2.1	De baja temperatura	28
2.3.2.2	De alta temperatura	29
2.4	Relaciones entre el secado y calidad de madera seca	30
2.4.1	Contracción	30
2.4.1.1	Deformaciones por contracción	31
2.4.1.2	Endurecimiento	31
2.4.1.3	Contracción anormal o celular	32
2.4.1.4	Grietas superficiales y en los extremos	33
2.4.2	Alabeo	34
2.4.3	Norma de clasificación visual por defecto de secado	35
2.5	Programas de secado	36
2.6	Procesos de secado	38

3	DEMANDA DE LA MADERA SECA Y SELECCIÓN DEL HORNO	40
3.1	Uso de madera y calidad requerida	40
3.1.1	Uso	40
3.1.2	Calidad requerida	40
3.1.2.1	Densidad de la madera	40
3.1.2.2	Especies	40
3.1.2.3	Dimensiones	40
3.1.2.4	Humedad requerida	41
3.2	Demanda	43
3.3	Condiciones climáticas	44
3.4	Instalaciones disponibles	44
3.5	Selección del tipo y capacidad del horno	45
3.5.1	Tipo	45
3.5.2	Capacidad	45
4	TECNOLOGÍAS DE HORNOS DE ALTA TEMPERATURA	48
4.1	Tecnologías disponibles	48
4.1.1	Hornos sin recirculación de aire	48
4.1.1.1	Sin recalentamiento	48
4.1.1.2	Con recalentamiento	49
4.1.2	Hornos con recirculación y sin recalentamiento de aire	50
4.2	Descripción general de un horno	51
4.3	Cubierta exterior	52
4.4	Cámara de secado	53
4.5	Sistema de circulación de aire	54
4.5.1	Ventiladores	54
4.5.1.1	Características	54
4.5.1.2	Ubicación	55

4.5.2	Ductos y codos.	57
4.5.3	Ventilas	57
4.6	Sistema de calentamiento de aire	58
4.6.1	Sistema de vapor	58
4.6.2	Agua caliente a baja presión	59
4.6.3	Intercambiador a gas.	59
4.6.4	Sistemas eléctricos	59
4.6.5	Otros sistemas.	59
4.7	Sistemas de medición y control	60
4.8	Sistemas complementarios.	61
4.9	Las pilas de madera.	61
4.10	Programas de secado	64
4.11	El proceso de secado en hornos	64
5	DISEÑO DEL HORNO	66
5.1	Planteamiento del problema	66
5.2	Metodología de diseño	68
5.3	Dimensiones y características del local	71
5.4	Determinación de la capacidad del horno	73
5.4.1	Dimensiones de las pilas y volumen de madera húmeda	74
5.4.2	Dimensiones de la cámara	83
5.5	Esquema general del horno	84
5.6	Parámetros de diseño	87
5.6.1	Climáticos	87
5.6.1.1	Temperatura del aire ambiente	87
5.6.1.2	Humedad relativa	87
5.6.1.3	Velocidad de viento	88

5.6.2 De la madera	88
5.6.3 Del interior del horno	89
5.6.3 .1 Programa de secado	90
5.6.3.2 Selección del programa de secado de diseño	93
5.6.4 Selección de las condiciones de diseño	93
5.7 Diseño térmico	94
5.7.1 Condiciones de operación	95
5.7.1.1 Calentamiento del horno.	96
5.7.1.2 Secado de madera	97
5.7.2 Procedimiento de cálculo gráfico psicrométrico	98
5.7.3 Calor para secado de la madera	99
5.7.3.1 Cálculo del caudal de aire de secado	101
5.7.3.2 Cálculo de la caída de temperatura y velocidad de secado de la madera	103
5.7.3.3 Cálculos psicrométricos	107
5.7.3.4 Temperaturas de los puntos interiores del horno.	108
5.7.4 Calor de pérdidas por cubierta exterior.	110
5.7.4.1 Pérdidas de calor sin aislamiento térmico.	115
5.7.4.2 Pérdidas de calor con aislamiento térmico.	120
5.7.5 Calor para calentamiento del horno	125
5.8 Diseño aerodinámico	129
5.8.1 Componentes del circuito aerodinámico.	129
5.8.2 Caudal total de ventiladores	131
5.8.3 Caída de presión	131
5.8.3.1 Factores de caída de presión.	131
5.8.3.2 Pérdidas totales	140

6	SELECCIÓN Y DISEÑO DE EQUIPOS E INSTALACIONES	143
6.1	Criterios generales	143
6.2	Selección de los ventiladores	144
6.2.1	Determinación del caudal y número de ventiladores	144
6.2.2	Cálculo de la potencia de los ventiladores.	145
6.3	Cálculo de las resistencias.	148
6.4	Diseño de las ventilas	153
7	EVALUACION ENERGETICA	165
7.1	Criterios generales	165
7.2	Consumo de energía térmica.	165
7.3	Consumo de energía de ventiladores.	166
7.4	Otros consumos de energía	167
7.5	Energía total y eficiencia del horno	168
8	EVALUACION DE COSTOS	170
8.1	Inversión en edificaciones	170
8.2	Inversión en equipos	172
8.4	Inversión en instalaciones	173
8.5	Inversión total	173
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	174
	BIBLIOGRAFIA	176

Índice de tablas

- 2.1 Composición química de la madera Elementos y compuestos en %
- 2.2 Contenido de humedad (%) recomendado según el uso de la madera
- 2.3 Humedad de equilibrio higroscópico en función de la TBS y la diferencia hidrométrica (TBS-TBH) °C del aire.
- 2.4 Humedad de equilibrio higroscópico promedio de la madera en diversos lugares del Perú
- 2.5 Programas de secado de madera de la JUNAC

- 3.1 Especies de maderas aptas para fabricar de carretes
- 3.2 Dimensiones de los para carretes.
- 3.3 Demanda semanal de madera seca
- 3.4 Clima de la zona de Pucallpa

- 4.1 Dimensiones y distancia de listones separadores en pilas de madera según es el espesor del listón.

- 5.1 Materiales del local existente para el horno

- 5.2 Altura de las pilas de madera según el espesor del listón
- 5.3 Ancho de pila, en m, según el número de filas en cámara de secado.
- 5.4 Volumen de Madera Húmeda por Pila (Pt)
- 5.5 Letra código de pila según su longitud
- 5.6 Longitud de un arreglo formado por tres pilas de madera
- 5.7 Arreglos seleccionados

- 5.8 Peso y volumen de los arreglos seleccionados
- 5.9 Peso según el contenido de humedad de la madera quinilla colorada
- 5.10 Datos de los arreglos pilas de quinilla colorada
- 5.11 Climas del Programa de secado moderado de la JUNAC
- 5.12 Datos de la pila
- 5.13 Datos de entrada para cálculos de secado de madera.
- 5.14 Resultados del cálculos del secado de madera.
- 5.15 Velocidad de secado de la madera
- 5.16 Resultados de cálculos del las condiciones del aire de secado
Incremento de humedad de aire y calor sensible
- 5.17 Temperaturas interiores del horno
- 5.18 Conductividad y conductancia térmica de diversos materiales
- 5.19 Áreas exteriores del horno
- 5.20 Coeficiente global de transferencia de calor sin aislamiento térmico
- 5.21 Pérdidas de calor sin aislamiento térmico programa de secado moderado periodo MA
- 5.22 Pérdidas de calor sin aislamiento térmico programa de secado moderado periodo MB
- 5.23 Pérdidas de calor sin aislamiento térmico programa de secado moderado periodo MC
- 5.24 Pérdidas de calor sin aislamiento térmico programa de secado moderado periodo MD
- 5.25 Pérdidas de calor sin aislamiento térmico programa de

- secado moderado periodo ME
- 5.26 Coeficiente global de transferencia de calor con aislamiento térmico
 - 5.27 Pérdidas de calor con aislamiento térmico programa de secado moderado periodo MA
 - 5.28 Pérdidas de calor con aislamiento térmico programa de secado moderado periodo MB
 - 5.29 Pérdidas de calor con aislamiento térmico programa de secado moderado periodo MC
 - 5.30 Pérdidas de calor con aislamiento térmico programa de secado moderado periodo MD
 - 5.31 Pérdidas de calor con aislamiento térmico programa de secado moderado periodo ME
 - 5.32 Calor de pérdidas por cubierta exterior
 - 5.33 Calor para calentar los componentes del horno.
 - 5.34 Calor para calentar la madera, el agua de la madera y los carritos porta pilas.
 - 5.35 Calor para secado de madera
 - 5.36 Calor para calentar el aire de secado
 - 5.37 Dimensiones de la sección transversal del horno.
 - 5.38 Ubicación de los ductos y Factores de caída de presión.
 - 5.39 Coeficiente de expansión brusca en el ventilador.
 - 5.40 Coeficiente de pérdidas en el ducto del falso techo K2
 - 5.41 Coeficiente de pérdidas en los codos.
 - 5.42 Coeficiente de pérdidas en el ducto de subida y bajada

- 5.43 Coeficiente de pérdidas en las pilas de madera.
- 5.44 Pérdidas totales en el horno.
- 6.1 Potencia y separación entre ejes de ventiladores.
- 6.2 Potencia requerida en las resistencias eléctricas.
- 7.1 Energía suministrada por las resistencias eléctricas
- 7.2 Potencia y energía de ventiladores
- 7.3 Energía total y eficiencia del horno.

Índice de figuras

Figura		Página
2.1	Estructura interior de un tronco de árbol	
2.2	Planos de corte y denominación de los cortes según su orientación	
2.3	Estructura macroscópica de un tronco de árbol.	
2.4	Estructura microscópica de un tronco de árbol	
2.5	Ubicación del agua en la célula.	
2.6	Resistencia y conductibilidad eléctrica según la humedad para la especie de madera <i>Sequoia sempervirens</i> .	
2.7	Humedad relativa del aire en función de su diferencia higrométrica.	
2.8	Diagrama de humedad de equilibrio de madera según TBS y HR del aire a velocidades mayores a 2 m/s.	
2.9	Forma de la muestra para observar si se ha producido el endurecimiento.	

- 2.10 Deformaciones por alabeo y abarquillado
- 2.11 Defectos por alabeo y valores permisibles según Normas de clasificación visual PAOT-REFORT para madera estructural
- 2.12 Programa de secado de madera – JUNAC
- 2.13 Velocidad de secado de la madera
- 3.1 Dimensiones de los carretes para alambre de cobre
- 4.1 Hornos sin recirculación ni recalentamiento de aire
- 4.2 Hornos sin recirculación y con recalentamiento de aire
- 4.3 Hornos con recirculación y recalentamiento de aire
- 4.4 Componentes principales de un horno
- 4.5 Ventilador ubicado sobre la pila
- 4.6 Ventiladores ubicados en la sección lateral
- 4.7 Listón de madera sumergido en la corriente de aire
- 4.8 Rejilla de listones de madera sumergido en una corriente de aire
- 4.9 Listón de secado y listón separador
- 4.10 Detalle de ubicación de los listones en una pila de madera.
- 4.11 Pila de listones de madera para secado
- 5.1 Flujograma de metodología de diseño
- 5.2 Vista isométrica del local disponible para el horno
- 5.3 Dimensiones del local disponible para adaptarlo como horno
- 5.4 Ubicación de las pilas en la cámara de secado
- 5.5 Distribución de los listones en la pila de madera
- 5.6 Arreglo de pilas en la sección transversal de la cámara de secado

- 5.7 Arreglo de las pilas de madera en la cámara de secado
- 5.8 Esquema del horno
- 5.9 Velocidad de secado de la madera
- 5.10 Diagrama de temperaturas en el interior y exterior del horno
- 5.11 Código de los climas de la cámara de secado según los programas de secado de la JUNAC
- 5.12 Climas de los programas de secado Moderado y Suave de JUNAC en el diagrama psicrométrico
- 5.13 Flujo de energía en el horno
- 5.14 Etapas de calentamiento y secado del horno
- 5.15 Diagrama esquemático de la carta psicrométrica con el cálculo gráfico y ubicación de puntos en el horno
- 5.16 Cálculos psicrométricos
- 5.17 Vista isométrica del horno.
- 5.18 Cubierta exterior del horno sin aislamiento.
- 5.19 Cubierta exterior del horno con aislamiento.
- 5.20 Circuito del flujo de aire.

PROLOGO

El presente trabajo titulado “Diseño de un horno para secar madera tipo bach”, está desarrollado en base a una necesidad surgida para secar madera. Comprende de 8 capítulos.

En el Capítulo 1, se hace un recuento de la situación actual de la industria de la madera, su problemática y perspectivas para el futuro inmediato. Y en ese contexto se revisan los problemas principales del secado de madera y su aplicación a productos industriales, en especial al caso de madera para la construcción de carretes para cable de cobre de uso eléctrico, que es el objetivo de la presente tesis.

En el Capítulo 2, se trata de las características que resultan importantes para el diseño del horno y entender el proceso del secado, tales como la constitución de la madera, las características del tronco, la humedad de la madera, sus conceptos y definiciones y su relación con los usos industriales de la madera. Se efectúa una revisión de los diversos métodos de secado que se utilizan para el secado industrial de la madera y los tipos de horno empleados y se tienen en cuenta las relaciones entre el secado y la calidad de la madera, así como las fallas que se producen por un sacado defectuoso. Por último se presentan los programas de

secado de la Junta del Acuerdo de Cartagena, JUNAC, que se toman como referencia para el diseño del horno

En el capítulo 3 se presentan las características de la madera que se va a secar en el horno y que determinan algunas condiciones de diseño, como la demanda de madera, requerimientos del producto al que se destinará la madera seca que en este caso son carretes para conductores eléctricos y las características del local disponible para utilizarlo como horno.

También se describe el horno y se señalan sus principales equipos e instalaciones. Se concluye con la selección del tipo de horno que se empleará determinando su capacidad y principales dimensiones.

En el Capítulo 4 se revisan las tecnologías disponibles de secado en hornos, los tipos de hornos existentes, con énfasis en los hornos con recirculación y recalentamiento de aire, con sus principales características y componentes como ventiladores, sistemas de calentamiento, medición y control. También lo referente a la conformación de las pilas de madera, los programas de secado y los procesos de secado.

En el Capítulo 5 se trata de diseño del horno, y de sus componentes, Se determina la capacidad, tipo y dimensiones del horno, luego se realizan los cálculos del secado, los cálculos psicrométricos del aire, el calentamiento del horno y sus componentes y el calor requerido para el secado con el que se dimensionan las resistencias eléctricas de calentamiento, y con los cálculos aerodinámicos se determinan las pérdidas de presión del flujo de aire en el interior del horno.

En el Capítulo 6, en base a los resultados anteriores se seleccionan los ventiladores y se realiza el cálculo de las resistencias eléctricas. Se calculan la potencia y energía requerida por cada uno de estos equipos.

En el capítulo 7 se realizan las evaluaciones del consumo de energía del horno y se determina su eficiencia total.,

En el capítulo 8 se determinan los costos de inversión considerando la inversión en obras civiles para adaptar el edificio existente como horno, y en la adquisición de la maquinaria y equipo.

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Objetivo

El objetivo de la presente tesis titulada “Diseño de un horno para secar madera tipo Bach”, es diseñar un horno convencional para secar madera adaptando un local existente en Pucallpa para secar 30 000 pies tablares de madera presecada con humedad inicial de 25 % hasta una humedad final del 15% requerida para fabricar carretes de madera para conductores de cobre.

1.2 Planteamiento del Problema

El problema se plantea como a adaptación de un local existente para construir un horno de alta temperatura, que cubra una demanda mensual de 120 000 pt de madera con humedad de 15%, partiendo de madera presecada con humedad promedio de 25 %. Para resolverlo se determina un tamaño de horno que se pueda construir en el local y luego realizar los cálculos de secado, psicrométricos del aire, y aerodinámicos para determinar la cantidad de calor requerido, y seleccionar las máquinas y

equipos complementarios. Se evalúa el consumo de energía y la eficiencia total del horno y se concluye con una evaluación de los costos del horno.

1.3 Antecedentes

Existen diversos trabajos relacionados con el secado de madera. Uno de los más antiguos es el de Moisés Ayona León, realizado como Tesis de grado de Ing. Química en la UNMSM en 1961, titulado “Instalaciones de un secador de madera en Pucallpa”. Otro trabajo importante es el “Estudio sobre el secado de madera en el Perú” realizado por Raúl Gonzáles Flores en 1980 como parte del Proyecto: PNUD/FAO/PER78/003 “Mejoramiento de los sistemas de extracción y transporte forestal.”

También es relevante el “Diseño de un horno secador de madera de 15 Ton de capacidad” realizado por Cúneo Lobiano y Pen Ku Chisen como Tesis de grado en ingeniería mecánica en la PUCP en Junio de 1980.

Otro muy importante por la aplicación de energía solar es la tesis de competencia profesional “Utilización de la energía solar en el diseño de un horno para secar madera con capacidad de 15 000 p.t.” de Catácora Acevedo, Edgar, sustentada en el año 1984, en la FIM UNI, donde trata por un lado el secado de la madera con un horno de alta temperatura y condiciones interiores constantes y por otro el uso de energía solar como fuente de energía para el secado.

1.4 Importancia y oportunidad del tema

El tema del diseño de hornos para secado de madera en la actualidad tiene gran importancia debido a las enormes posibilidades que tiene el Perú de explotar sus grandes riquezas forestales. La superficie forestal del Perú representa el 68% del territorio donde se estiman que hay 80 millones de hectáreas de bosques naturales y 8 millones de hectáreas de tierras aptas para ser reforestadas. Esta situación coloca al Perú entre los países del mundo con mayor superficie forestal, a nivel mundial en el octavo lugar y considerando solo América Latina, ocupa el segundo lugar, superado solo por Brasil.

La producción de madera en el Perú es muy limitada y dista mucho de aprovechar convenientemente esta riqueza natural por lo que el Gobierno, con la finalidad de impulsar la producción y exportación de productos madereros, inició el proceso de concesiones forestales y entregó 3,2 millones de hectáreas en Ucayali y Madre de Dios.

Están surgiendo pequeñas y medianas empresas dedicadas a la explotación de la madera, pero ellas generalmente venden la madera con alto contenido de humedad porque no cuentan con hornos para realizar el secado. Contar con el horno les permitiría incrementar sus ingresos porque el precio de la madera seca es mayor que el de la madera húmeda.

1.5 Limitaciones

La limitación del presente trabajo resulta del hecho que el proceso de secado es complejo y requiere de datos experimentales que estarán disponibles cuando se efectúen las pruebas del horno. Por este motivo en el cálculo teórico se realizan algunas aproximaciones.

Los cálculo del los flujos de calor del secado de la madera se efectuaron asumiendo una velocidad de secado constante durante cada periodo, aún cuando se sabe que esta velocidad es variable. Con los datos reales del flujo de calor, que deben ser menores a los teóricos se podrá reajustar el diseño.

El cálculo de la caída de presión del aire en el horno es aproximado. Sin embargo, los factores de seguridad aplicados dan fiabilidad a la selección de los ventiladores. Esto debido a que el cálculo de la caída de presión en la cámara de secado es aproximado debido a la forma de las pilas.

Los sistemas de regulación y control se tocan tangencialmente debido a que por su complejidad caen en el campo de la ingeniería electrónica.

Los resultados obtenidos son conservadores pero permiten dimensionar el horno de modo que sus equipos cumplan con las máximas exigencias a las que estarán sometidos, y en otras condiciones, que funcione de modo óptimo gracias a su sistema de regulación y control.

CAPITULO II

SECADO DE MADERA

2.1 Características de la madera

La madera se obtiene del tronco de los árboles, el cual le sirve a estas plantas como:

- Soporte, de las ramas que forman la copa del árbol.
- Conducto de las sustancias líquidas que fluyen en la planta, a través de sus vasos como los leñosos y liberianos.
- Almacén de agua y sustancias nutritivas excedentes elaboradas por la planta.

Para cumplir estas funciones, la madera es resistente pero como tiene muchos conductos y cavidades interiores es muy porosa por lo que es un material de elevada resistencia en relación con su peso.

2.1.1 Estructura del tronco del árbol

2.1.1.1 Partes principales

La estructura interior de un tronco de un árbol, Fig. 2.1 la forman tres componentes principales dispuestos en forma concéntrica: la corteza exterior o floema, el núcleo central o xilema, que es la madera

propriadamente dicha y una capa intermedia entre ambas, denominada cambium.

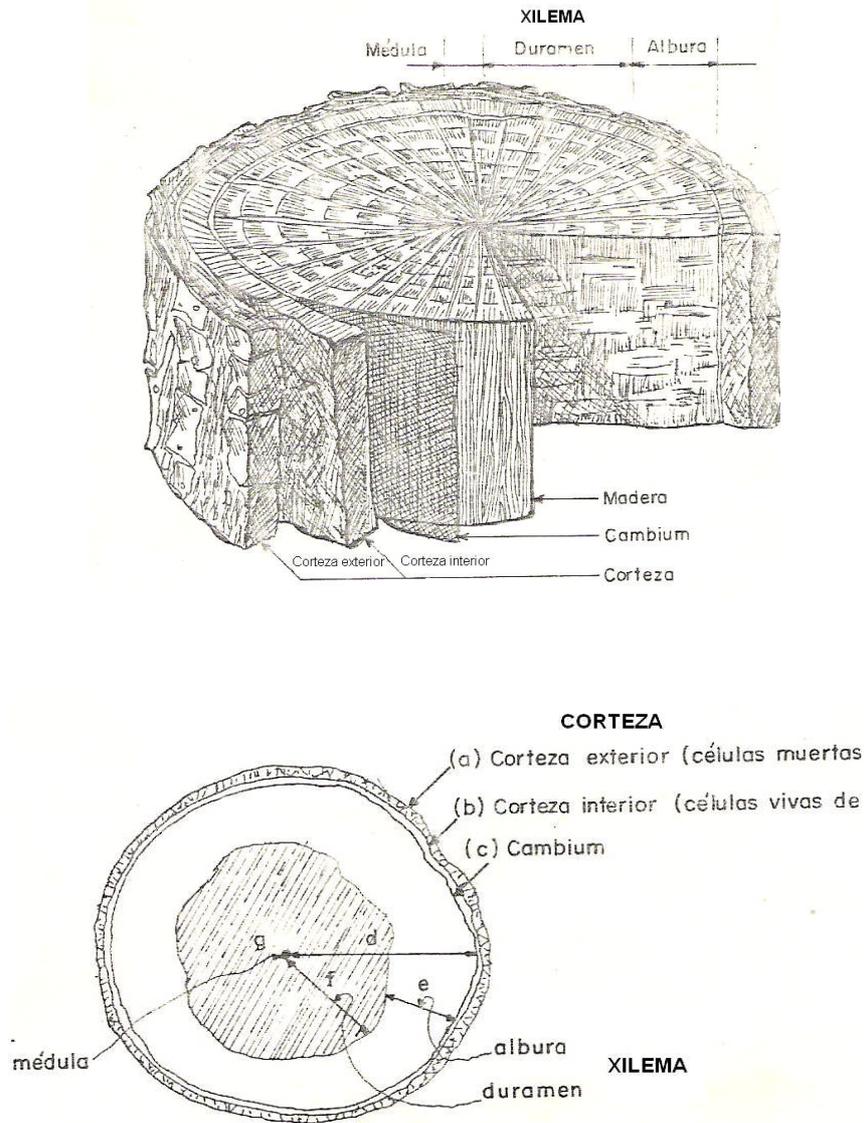


Fig. 2.1 Estructura interior de un tronco de árbol.

2.1.1.1 La corteza

La forma el tejido llamado floema, que tiene dos capas:

a) Corteza exterior.

Tiene la función de proteger del tronco, y está formado por las células muertas del floema.

b) Corteza interior.

Está formada por células vivas de floema. Su función es conducir la sabia elaborada (alimento) a toda la planta a través de los vasos liberianos, por lo que también se llama liber.

2.1.1.2 El cambium

Es la capa intermedia entre la corteza y la madera. Esta formada por un tejido cuyas células se dividen de modo que forman hacia el exterior células de floema, y hacia el interior células de xilema. El crecimiento de estas células es permanente y cada año forman una nueva capa anular llamada anillo de crecimiento que aumenta el diámetro del tronco.

2.1.1.3 La madera o xilema

Es la parte leñosa del tronco y se divide en 3 capas:

a) La albura.

Es la capa exterior del xilema. Su función es conducir la sabia bruta (agua y sales minerales) de las raíces hasta las hojas, a través de los vasos leñosos. Su organización estructural es compleja y hace de la madera un material anisótropo, con propiedades mecánicas diferentes en sus diferentes planos de corte.

b) El duramen.

Es la capa interior que se forma cuando la albura pierde agua y se infiltra con aceites, resinas, gomas y otras sustancias, que modifican su consistencia dándole la resistencia necesaria para servir de soporte a la planta. Se distingue de la albura por su color más oscuro.

c) La médula

Es la parte central del tronco, y esta formado por tejido parénquimático.

2.1.1.2 Planos de la madera

Para sistematizar el corte de los troncos en trozas de madera, al tronco se han establecido tres planos o secciones de corte y a las trozas se les denomina según su plano de corte, Fig. 2.2

- Sección perpendicular: El corte es perpendicular al eje del tronco.
- Sección tangencial: El corte es paralelo al eje del tronco y tangencial a los anillos de crecimiento.
- Sección radial: El corte tiene dirección radial, y va de la médula a la corteza, perpendicular a los anillos de crecimiento.
- Las trozas, o secciones de madera cortadas del tronco se denominan, según su orientación en: Corte radial, corte tangencial corte oblicuo.

2.1.1.3 Estructura macroscópica

Se consideran las principales características de los tejidos que se observan a simple vista con ayuda de una lupa de 10 aumentos, Fig. 2.3; identificándose:

- Los anillos de crecimiento.
- Los radios medulares, que son radios formados por tejido parénquimático, que durante el secado pueden producir grietas

- Parénquima longitudinal, que es un tejido parénquimático que sirve para identificar la especie.

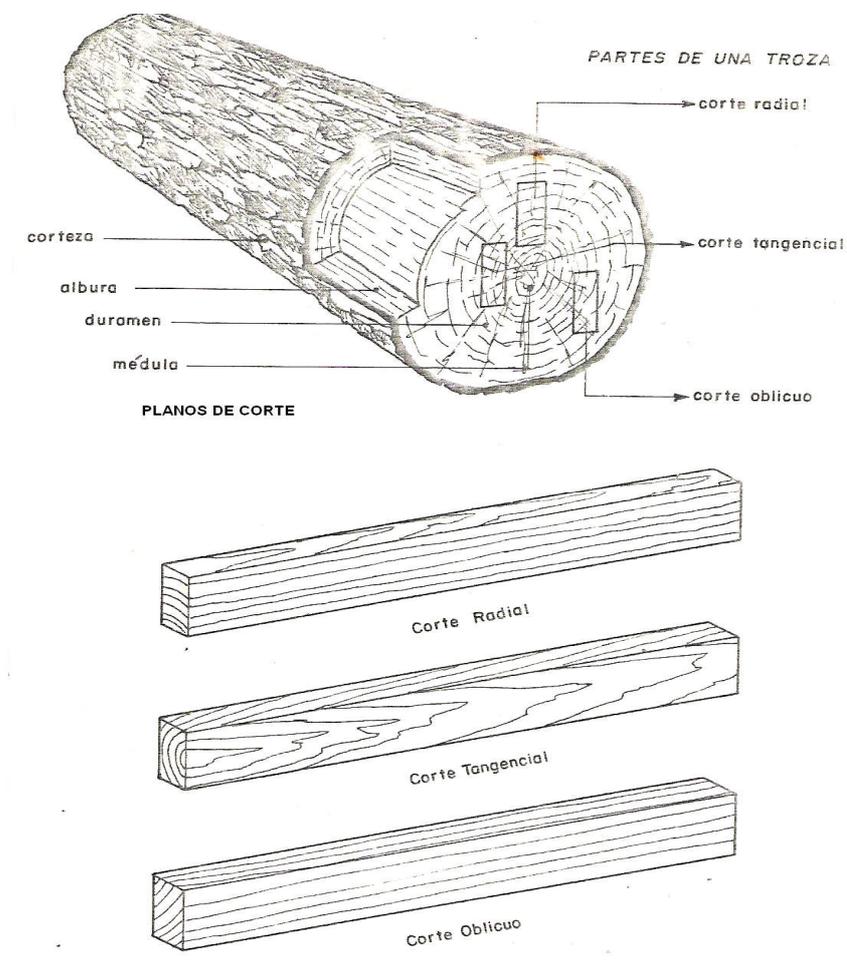
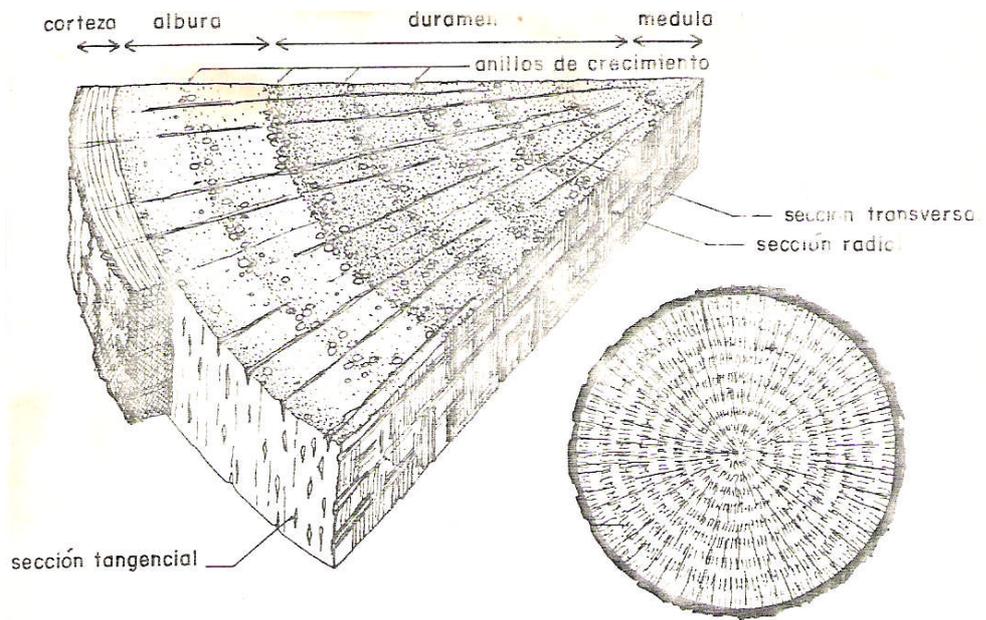
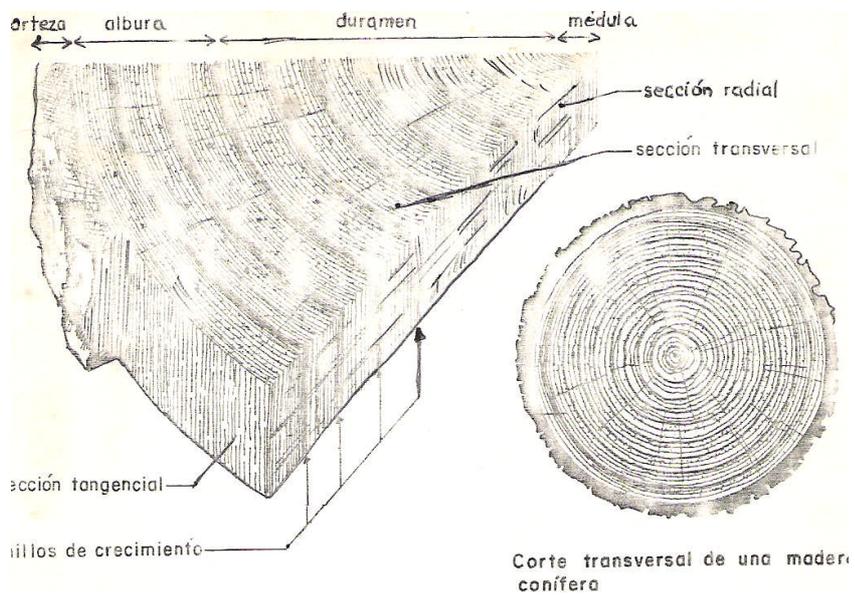


Fig. 2.2 Planos de corte y denominación de los cortes según su orientación



a) Madera latifoliada



b) Madera conifera

Fig. 2. 3 Estructura macroscópica de un tronco de árbol.

2.1.1.4 Estructura microscópica

Tiene en cuenta los tipos y características de las células de los tejidos, Fig. 2.4, los que por sus características dividen las especies maderables en dos grupos:

a) Maderas Latifoliadas.

Tienen una estructura anatómica heterogénea, El parénquima forma un tejido leñoso blanco con células adaptadas a la función mecánica que incrementan su densidad y son del 6 al 50% del total. En las especies tropicales, que son las nuestras superan el 50% del volumen total.

b) Maderas coníferas

Tienen una estructura anatómica homogénea formada por traqueídas, que son elementos leñosos que ocupan del 80 al 90% del volumen total de la madera.

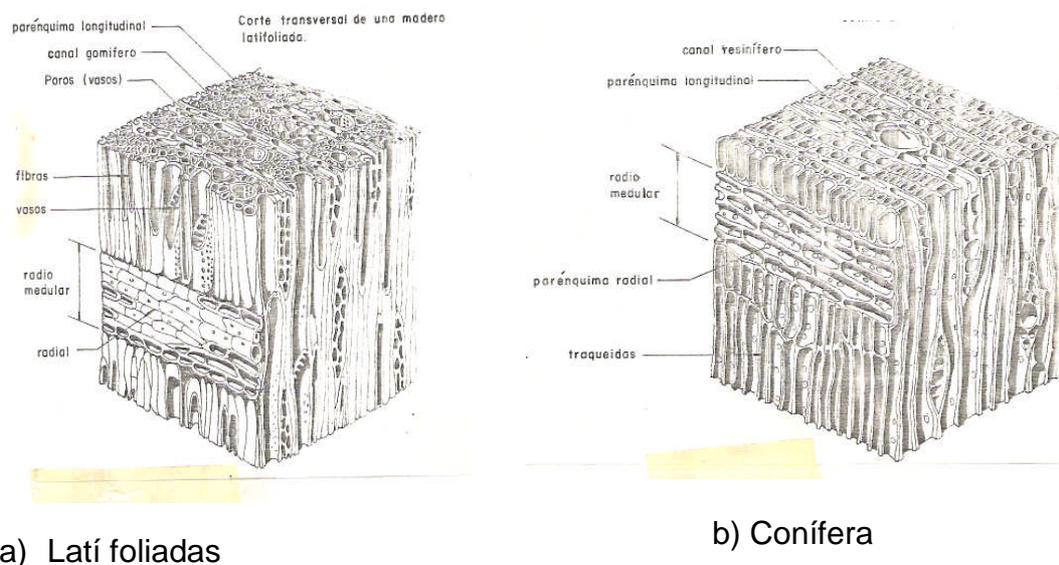


Fig. 2.4 Estructura microscópica de un tronco de árbol.

2.1.2 Composición química de la madera

La madera es un material orgánico que tiene la composición: química porcentual que se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Composición química de la madera. Elementos y compuestos en %

Elementos químicos	%	Compuestos químicos	%
Carbono (C)	49	Celulosa	40-60
Hidrógeno (H)	6	Hemicelulosa	5 - 25
Oxígeno (O)	44	Pignina	20-40
Nitrógeno (N) y minerales.	1		

2.1.3 Humedad de la madera

2.1.3.1 Contenido de agua

El agua se almacena en la madera de dos formas, Fig. 2.5:

a) Agua almacenada: Es la que se puede extraer de la madera y la forman el:

- Agua libre, almacenada en el lumen o cavidad central de la célula. Le da la condición de verde a la madera.
- Agua de saturación o higroscópica, llamada también agua de inhibición o absorbida, se almacena en las paredes celulares.

b) Agua incorporada: Es la que no se puede extraer, porque como agua de constitución forma parte de las células, a menos que se destruyan las células destruyendo la madera.

El contenido de agua de la madera en los árboles vivos es variable, estando en el rango del 26 al 35% de contenido de humedad porcentual en peso que representan un contenido de humedad del 35 al 200% en base a materia seca. Esta variación se debe principalmente al agua almacenada y depende de la especie del árbol y dentro de una misma especie, influyen el clima, la estación del año y al lugar donde este se encuentra.

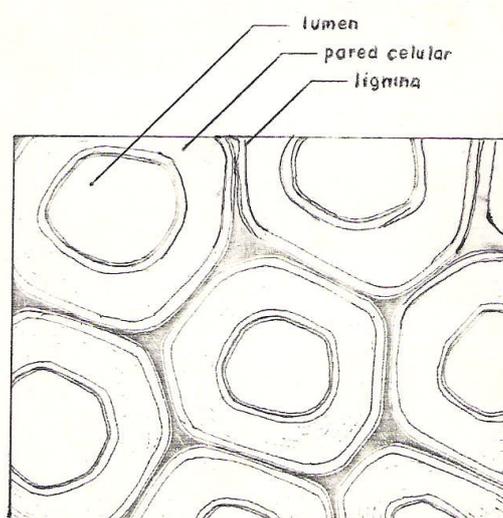


Fig. 2.5 Ubicación del agua en la célula

La especie tiene relación directa porque el tipo y cantidad de células determinan la porosidad de la madera y su capacidad de contener agua almacenada, es decir agua libre y de saturación. Las maderas porosas son más livianas y pueden almacenar más agua que las menos porosas que son más pesadas, así por ejemplo, en la familia bombacácea, las especies como la balsa (*Ocotea lagopus*) y la ceiba-banga (*Ceiba pentandra*) pueden almacenar agua hasta el 100% de su peso seco. Es decir su peso húmedo es el 200 % de su peso seco. Otro caso similar es el álamo (*populus* sp).

2.1.3.2 Definición de humedad de la madera.

Es el contenido de agua extraíble de la madera o agua almacenada. No se tiene en cuenta el agua de constitución. La madera está sin humedad, anhidra, o seca cuando se le extraído toda el agua almacenada y solo contiene agua de constitución. En la práctica esto ocurre cuando la madera alcanza un peso constante a una temperatura de 103 ± 2 °C.

2.1.3.3 Contenido de humedad

Es el valor porcentual de la humedad contenida en la madera, con respecto a su peso seco o anhidro.

$$CH = \frac{Ph - Ps}{Ps} \times 100 \quad (2.1)$$

CH = Contenido de humedad de la madera, respecto a su peso seco (%)

Ph = es el peso de la madera en estado húmedo.

Ps = es el peso de la madera en su estado anhidro.

El contenido de humedad también se expresa con respecto al peso húmedo, como en el caso de la industria de la pulpa de madera, y se expresa como:

$$CH_x = \frac{Ph - Ps}{Ph} \times 100 \quad (2.2)$$

CH_x = contenido de humedad de la madera, respecto a su peso húmedo.

Entre el contenido de humedad en base seca, CH y el contenido de humedad en base húmeda CH_x existen las relaciones:

$$CH = \frac{100 CH_x}{100 - CH_x} \quad (2.3)$$

$$CH_x = \frac{100 CH}{100 + CH} \quad (2.4)$$

2.1.3.4 Métodos de determinación

Para determinar la humedad existen métodos de laboratorio y métodos industriales. Los de laboratorio se usan para investigación, son muy complejos pero tienen una gran precisión. Algunos de ellos son:

- a) Secado al vacío con sustancias higroscópicas.
- b) Destilación de la madera.
- c) Expulsión directa del agua por presión. Uso del alcohol y sustancias azucaradas.

Los métodos industriales, son más simples, rápidos y tienen un rango de precisión adecuado. Algunos son:

- d) Peso seco al horno.
- e) Métodos eléctricos.
- f) Métodos psicrométricos

En el método de peso seco al horno, una muestra de probeta estándar se pesa húmeda luego se seca el horno a una temperatura de $103 \pm 2^\circ \text{C}$ en un período de 20 a 60 horas durante el cual la probeta se pesa varias veces hasta obtener un peso constante. El contenido de humedad se obtiene con la ecuación (2.1).

Los métodos eléctricos se basan en dos propiedades eléctricas de la madera: la resistencia óhmica y la constante dieléctrica que dependen de

su humedad, las que se miden aplicándole una tensión alterna de alta frecuencia.

La constante dieléctrica varía notoriamente en el rango de contenido de humedad del 4 al 25% y encima de este valor las variaciones son mucho menos notorias. En el caso de la resistencia eléctrica, el logaritmo de la resistencia varía linealmente con el contenido de humedad, desde el estado anhidro hasta el punto de saturación de fibras. En el rango del 8 al 18% se tiene:

$$\text{Log } r = 13,25 - 0,32 \text{ CH} \quad (2.5)$$

En la figura 2.6, se muestra esta variación para la sequoia sempervirens, pero las tendencias son similares para otras especies de maderas.

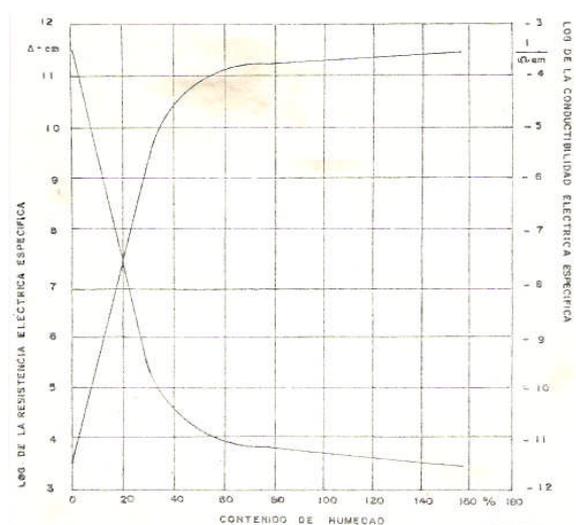


Fig. 2.6 Resistencia y conductibilidad eléctrica según la humedad para la especie de madera Sequoia sempervirens.

Los métodos psicrométricos se basan en que la relación entre el contenido de humedad de la madera y la humedad del aire es única, constante y no depende de la especie de madera.

2.1.3.5 Efectos

El contenido de humedad influye sobre algunas propiedades, como la resistencia mecánica. Así, ésta aumenta al reducirse el contenido de humedad. También tiene relación directa con el uso de la madera. En la Tabla 2.3 se muestran usos típicos de la madera para varios rangos de contenido de humedad.

2.1.4 Relación entre humedad y secado

2.1.4.1 Parámetros que influyen

Influyen parámetros del aire y la madera. Los del aire son: la temperatura de bulbo seco TBS, la temperatura de bulbo húmedo TBH o la humedad relativa HR y su velocidad, y los de la madera, influyen las humedades inicial y final, el área expuesta al secado y el tiempo de secado. La especie de madera se relaciona con la máxima temperatura que se puede aplicar en el secado.

2.1.4.2 Humedad de equilibrio

Es la humedad de la madera que permanece constante en un ambiente donde el aire tiene una TBS y HR constantes. Esta humedad no depende de la especie del árbol existen tablas y diagramas que permiten determinarla a partir de la TBS, TBH o HR del aire.

Tabla 2.2 Contenido de humedad (%) recomendado según el uso de la madera

Uso de la madera	Contenido de humedad %	
	Promedio	Rango
Durmientes y postes, tratados con preservantes	25	Agua libre
Canastas y empaque de frutas	20	8 – 45
Embarcaciones, tanques y silos	12	12 – 15
Cajas	12	6 – 15
Revestimientos de autos	12	8 -16
Piezas delgadas para revestimientos exteriores	10	10 - 12
Ataúdes	9	7 – 12
Tablas para vigas y viguetas	8	6 – 20
Sillas y partes	6	5 - 12
Pisos	6	6 - 10
Muebles	6	4 - 10
Mangos.	7	2 - 10
Mangos para brochas.	5	2 - 10
Marcos, puertas, celosías, etc.	6	4 - 8
Instrumentos musicales, cajas de piano	5	3 - 6
Hormas para zapatos	5	4 - 6
Chapas y láminas: - Caras	4	2 - 7
- Interiores	5	2 - 9
Triplay	6	

Si se conocen la TBS y TBH del aire se determina la diferencia higrométrica:

$$Dg = TBS - TBH \quad (2.6)$$

Con esta se puede determinar la HR del aire con el gráfico psicrométrico de la Fig. 2.7.

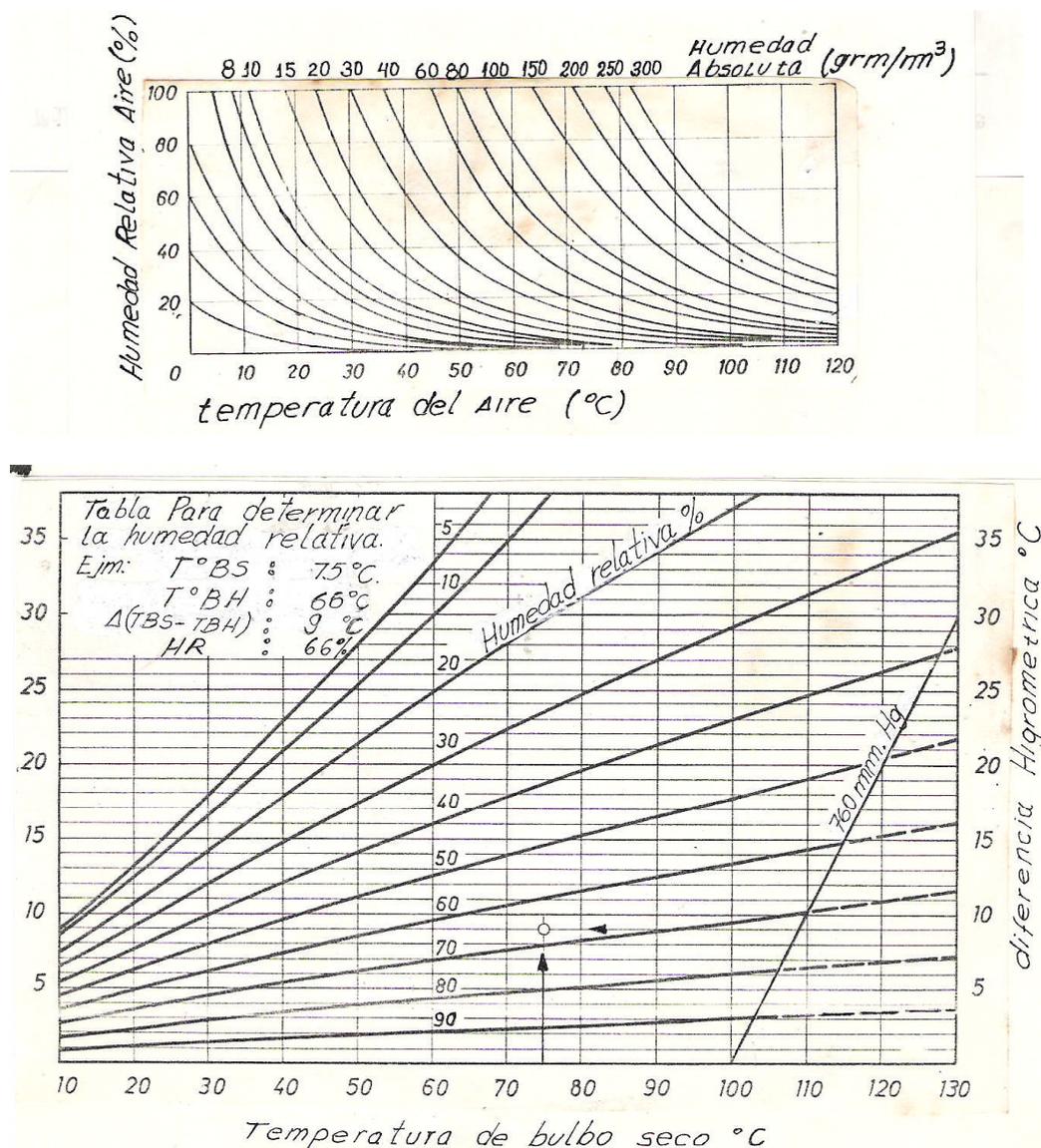


Fig. 2.7 Humedad relativa del aire en función de su diferencia higrométrica.

Y con esta HR determinar la humedad de equilibrio de la madera en el gráfico de la Fig. 2.8.

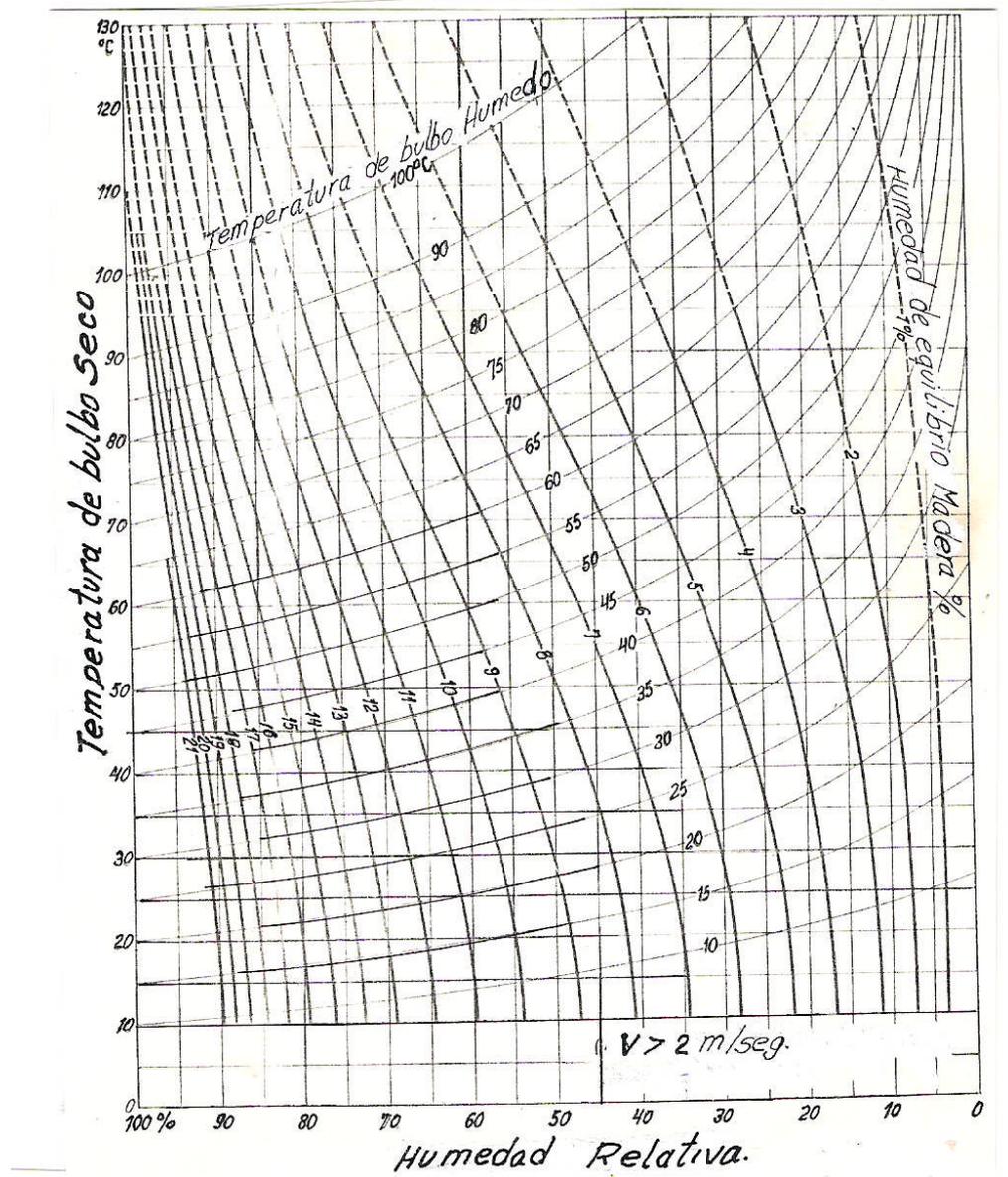


Fig. 2.8 Diagrama de humedad de equilibrio de madera según TBS y HR del aire a velocidades mayores a 2 m/s.

Alternativamente, con la diferencia higrométrica se determina la humedad de equilibrio en la tabla 2.2

Con este criterio se ha determinado la humedad de equilibrio promedio de la madera en diferentes lugares del Perú, las que se muestran en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Humedad de equilibrio higroscópico promedio de la madera en diversos lugares del Perú

Departamento	Temperatura media anual (%)	Humedad Relativa media anual (%)	Humedad de Equilibrio Higroscópico (%)
Arequipa	16,40	55	10,60
Cusco	11,80	64	11,80
La Molina	23,20	75	14,50
Lima	19,00	75	15,00
Selva Central	21,60	75	14,60
Trujillo	20,50	81	17,00
Iquitos	26,70	80	16,80

Fuente: SENAMHI

2.1 Secado

Es el proceso por el cual se extrae humedad a la madera, el que se puede realizar en condiciones naturales o artificiales. El secado se realiza cuando se pone la madera en contacto con aire no saturado porque éste produce la evaporación del agua superficial de la madera. Convencionalmente se consideran dos etapas:

2.2.1 Presecado

En el presecado se extrae el agua libre de saturación. El agua superficial se evapora y deja un espacio libre que es ocupado por el agua de las cavidades vasculares y del lumen de las células interiores, que fluye por capilaridad. El presecado termina cuando se extrae toda el agua libre, desde el estado verde hasta el PUNTO o ZONA DE SATURACIÓN DE FIBRAS (PSF).

Se ha determinado experimentalmente que este porcentaje de contenido de humedad, según las especies de madera, está comprendido entre el 21 y 32%, y también que no se producen cambios dimensionales ni alteraciones de las propiedades mecánicas de la madera. Esta etapa se caracteriza porque el secado se realiza a velocidad constante.

2.2.2 Secado

Consiste en extraer el agua de saturación o higroscópica almacenada en las paredes celulares. En este caso la velocidad de secado disminuye y el secado se detiene cuando, llega a la humedad de equilibrio con el aire. Si la humedad del aire se reduce, el secado continúa hasta cuando la madera queda con una humedad relativa del 18 al 12% que es el contenido mínimo de humedad en estado seco o anhidro.

En esta etapa se producen cambios dimensionales de la madera y dependiendo de las condiciones del secado se pueden producir fallas como torceduras, curvaturas y rajaduras que causan grandes pérdidas económicas

2.2 Métodos

Se tienen dos métodos claramente diferenciados; los métodos de secado al medio ambiente y los métodos de secado al horno.

2.3.1 En el medio ambiente

Es el secado natural donde la madera está expuesta a las condiciones ambientales climáticas naturales que generalmente son temperaturas del orden de los 30 °C o menores a la HR ambiental.

Como no se tiene control sobre los parámetros del aire el secado, demora mucho y se producen fallas en la madera.

2.3.2 En hornos

El secado se realiza en ambientes especiales, con climas interiores parcial o totalmente controlados, los que se pueden mantener constantes o variar a voluntad, de modo que se produzcan humedades de equilibrio progresivamente más bajas, para evitar fallas en la madera.

Los hornos tienen una cámara de secado, donde se almacena la madera, un sistema de circulación de aire impulsado por uno o mas ventiladores, un sistema de calentamiento del aire, un sistema de control de la humedad relativa, formado por ventilas para deshumidificar el aire, o un humidificador, los que operan según sea necesario. Los equipos cuentan con sistemas de control, manuales o automáticos que permiten alcanzar, mantener y/o modificar el clima interior del horno.

Como desventaja, tiene a una alta inversión inicial que varía según el grado de sofisticación de los equipos, y el costo de operación, para el cual el precio de la energía es importante.

Como ventajas, tiene dos relevantes: realizar un secado óptimo, reduciendo al mínimo las fallas en la madera, y un secado muy rápido, reduciendo el tiempo de secado de 10 a 40 veces con relación al secado al ambiente.

Existen dos grandes grupos de hornos: los de baja temperatura o convencionales y los de alta temperatura.

2.3.2.1 De baja temperatura

Se caracterizan porque realizan el secado con temperaturas del orden de 50 °C y se utilizan principalmente en el etapa de presecado, para secar la madera de su estado verde hasta una humedad del 30 al 20%; es decir elimina toda el agua libre, y hasta aproximadamente un tercio del agua de saturación.

Estos sistemas se aplican con ventaja en zonas tropicales, donde el clima es húmedo, por que reducen grandemente el tiempo de secado.

a) Sistemas de presecado.

-Secado bajo cubierta.

Las pilas de madera se tapan con una cubierta, temporal o permanente que cubre las paredes laterales y el techo. Los lados frontal y posterior quedan libres y en uno de ellos se ubica un ventilador, extractor o soplador, que hace circular el aire a velocidad constante aproximada de 1 m/s.

La cubierta es de un material que es un buen aislante térmico y resistente a la intemperie como lona, plástico, madera u otro parecido. Cuentan con un sistema de calentamiento y control de la humedad relativa

que mantienen la temperatura en el rango de 40 a 50 °C y la HR entre el 60 y 65 %.

- Presecaderos.

Un presecadero es un gran bodega, con capacidades entre 100 y 2000 m³ para secar madera desde su estado verde hasta una humedad del 20%. En este caso la madera se apila en la cámara de secado, y se somete a una corriente de aire con temperatura, humedad y velocidad controladas.

Tiene dos diferencias con el anterior sistema: una es que la cubierta temporal se reemplaza por un local permanente diseñado especialmente como pre-secadero, y la otra es un nivel de control más preciso de sus sistemas.

2.3.2.2 De alta temperatura

Llamado también convencional, es el secado artificial propiamente dicho y se diferencia del anterior porque las temperaturas varían de 45 a 95 °C y se utilizan para eliminar agua de saturación, desde el rango de humedad de presecado, hasta la humedad requerida en las aplicaciones industriales de la madera, que algunas veces debe ser anhidra, con un contenido de humedad del 12%.

Su esquema general es similar al de un presecadero, pero se diferencia por la calidad de sus instalaciones, la precisión de sus sistemas de control, y en el rango de temperaturas y humedad relativa del aire con que operan.

2.3 Relaciones entre secado y calidad de madera seca

La calidad de la madera seca la determina la ausencia de imperfecciones o fallas ocasionadas por el proceso de secado de modo que no se reduzca el valor comercial de la madera. Algunas fallas las causan el propio proceso de secado, y se producen de todas maneras, independientemente del método de secado utilizado mientras que otras las causan los métodos inadecuados de secado por lo que son evitables.

Las fallas que reducen la calidad y el valor de la madera son deformaciones, endurecimiento y manchado químico y las que la inutilizan son: grietas y cavidades interiores. Algunas de estas no se ven a simple vista al final del secado, si no en operaciones posteriores de aserrado y cepillado de la madera seca.

La causa principal de las fallas es la contracción no uniforme de las células de la madera, la cual depende de la estructura anatómica de la madera, del contenido de humedad de sus células y la temperatura, la humedad relativa y la velocidad del aire de secado. Por esto existe una relación directa entre la calidad de la madera seca y el control de la temperatura, humedad relativa y velocidad del aire de secado del horno.

Todos estos defectos se pueden reducir al final del secado con un tratamiento final manteniendo una adecuada temperatura y humedad relativa del aire de secado.

2.4.1 Contracción.

En el secado, primero se elimina el agua libre, según 2.2.1 y después se elimina el agua de saturación que se almacena en las paredes

celulares, lo que causa el adelgazamiento de estas paredes y una reducción del tamaño de la célula, es decir, la célula se contrae.

La magnitud de la contracción depende de las características anatómicas de la especie, variando de una especie a otra, así, las maderas pesadas de mayor peso específico se contraen más que las ligeras de menor peso específico. Es más, aún en un mismo árbol, la contracción es diferente en las células de las inmediaciones de un anillo de crecimiento.

2.4.1.1 Deformaciones por contracción

La contracción se puede dar en las direcciones radial, tangencial y axial. La contracción tangencial es 2 veces la radial, y la axial es menor al 0,10% a 0,20% de la longitud del tronco. Las diferencias entre las contracciones radial y tangencial provocan la deformación de las maderas durante el secado causando que las piezas de sección cuadrada se deformen a romboides, las de sección rectangular se vuelvan cóncavas y las redondas elipsoidales.

2.4.1.2 Endurecimiento

Es la contracción de las capas superficiales. Cuando ellas pierden agua rápidamente se contraen ocasionando una tensión de tracción provocando que las células interiores sufran tensiones de compresión. Si estos esfuerzos combinados son menores que el límite proporcional de elasticidad de las fibras de la madera, no se produce ningún defecto, pero si son mayores se produce el endurecimiento de las células superficiales. Este endurecimiento obstruye o cierra el paso al vapor producido por las células interiores y el proceso de secado reduce su velocidad o se detiene.

Para identificar el endurecimiento se corta una muestra rectangular de la madera que se está secando, a la que se le tallan ranuras en forma de peine, Fig. 2.9 con 4 ó 5 dientes. Si los dientes de la muestra:

- | | | |
|-----------------------------|---|---------------------------|
| No se deforman | : | No hay endurecimiento |
| Se deforman | : | Hay endurecimiento |
| - Curvado hacia el exterior | : | - Tensiones de tracción |
| - Curvado hacia el interior | : | - Tensiones de compresión |

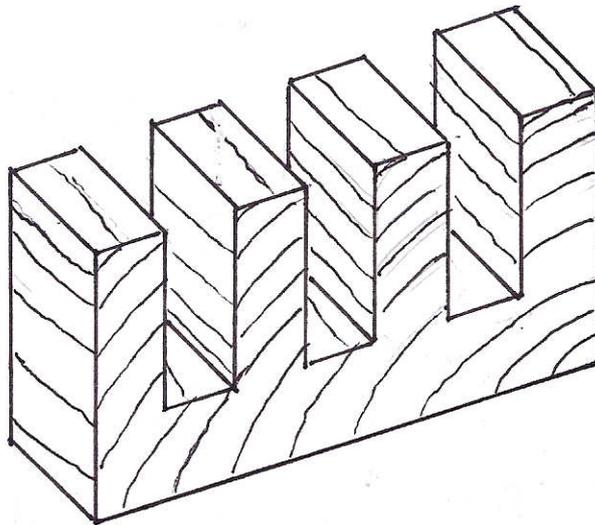


Fig. 2.9 Forma de la muestra para observar si se ha producido el endurecimiento.

El endurecimiento se corrige aliviando las tensiones, rehumidificando las células contraídas, lo que se hace humidificando el aire de secado. Pero si la rehumidificación de la madera es excesiva, se produce el fenómeno inverso y también se invierten las tensiones de tracción y compresión.

2.4.1.3 Contracción anormal o celular.

Se produce cuando la madera de células de paredes delgadas, verde o muy húmeda se somete a un alto gradiente de secado, lo que provoca que las células superficiales tengan una evaporación grande y rápida provocando que también salgan las burbujas que normalmente están en las células.

Las células se contraen y producen tensiones. Si estas son mayores que las de la madera, se produce el colapso de las células, lo que causa tensiones irregulares que provocan la aparición de grietas internas. Su presencia se reconoce exteriormente por una severa contracción o una deformación irregular de la madera en su sección transversal.

El colapso se produce aún cuando la madera tenga un alto contenido de humedad con abundante agua libre en sus células. Este puede corregirse con un aire de alto contenido de humedad relativa, saturado a 100 °C y vapor de agua. Si no se corrige y ya se han producido hendiduras interiores, la madera ya no es aprovechable porque los grandes hundimientos celulares producen grandes cavidades interiores. Esto ocurre mucho en maderas tropicales.

2.4.1.4 Grietas superficiales y en los extremos.

Se presentan en las primeras etapas del secado cuando por aplicación de un alto gradiente de secado, se produce el secado rápido de la superficie de los extremos de los listones. En ellos se producen contracciones que si superan la resistencia de las células causan grietas. En su parte central también se producen tensiones pero no contracciones porque la madera húmeda de las zonas internas lo impide. Estos defectos se

pueden evitar con las siguientes medidas preventivas aplicadas antes del secado:

- Evitar corrientes de aire seco sobre la madera húmeda.
- Proteger los extremos de los listones con un producto que evite su rápida evaporación en el sentido longitudinal.
- Para especies valiosas se puede aplicar un tratamiento de polietilenglicol.

2.4.2 Alabeo.

El alabeo es la curvatura de una pieza de madera, a lo largo de su eje longitudinal, transversal o de los dos, que se produce por la propiedad de contracción de la madera. Se debe a una causa natural y no a un defecto del secado por lo que se deben mantener estas deformaciones dentro de límites razonables. Los principales tipos de alabeo, Fig.2.10 son: abarquillado, arqueadura, encorvadura, torcedura y rajadura.

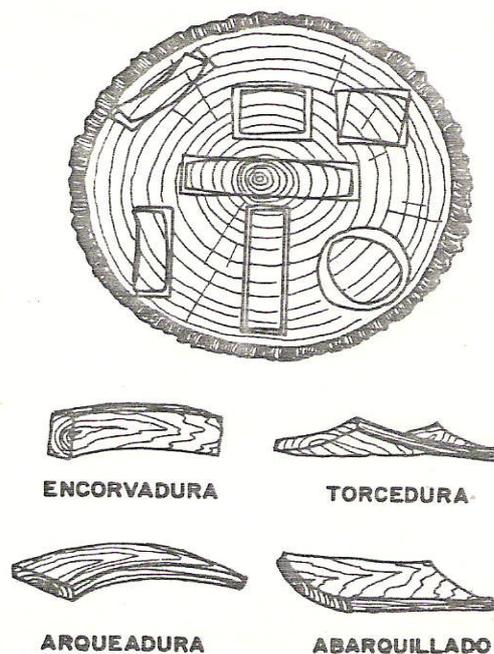


Fig. 2.10 Deformaciones por alabeo y abarquillado

2.4.3 Norma de clasificación visual por defecto de secado

Se recomienda el uso de la norma de clasificación visual PAOT-REFORT para clasificación de madera estructural cuyas disposiciones se resumen en la Fig.2.11.

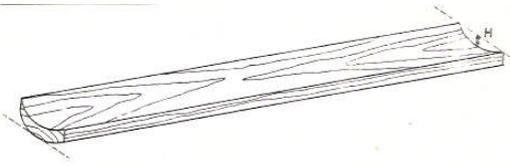
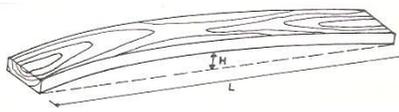
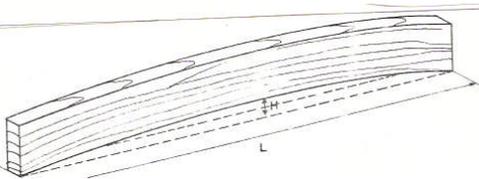
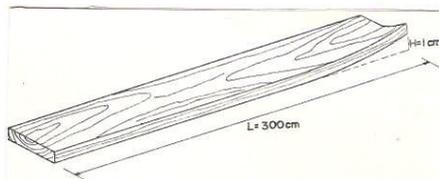
<p>Defecto: Abarquillado</p>  <p>Valor permisible: $H/L < 0.01$</p>	<p>Defecto: Arqueadura</p>  <p>Valor permisible: $H/L < 0.33$</p>
<p>Defecto: Encorvadura</p>  <p>Valor permisible: $H/L < 0.33$</p>	<p>Defecto: Torcedura</p>  <p>Valor permisible: $H/L < 1/300$</p> <p>Máximo es una torcedura en una sola arista.</p>

Fig. 2.11 Defectos por alabeo y valores permisibles según Normas de clasificación visual PAOT-REFORT para madera estructural

2.4 Programas de secado.

Un programa de secado contiene las instrucciones para realizar un secado adecuado de la madera. En el se establecen los valores de la temperatura de Bulbo seco (TBS) y de Bulbo húmedo (TBH) del aire de secado, su humedad relativa y el tiempo en que deben permanecer constantes estos valores. En resumen, establece el clima interior del horno y señala el tiempo durante el cual debe permanecer constante. Se presentan como tablas o gráficos .Fig. 2.12.

Existen programas de secado típicos que son el resultado de investigaciones de instituciones especializadas como la JUNAC (Junta del Acuerdo de Cartagena) que ha desarrollado programas de secado especiales para las maderas tropicales andinas, Tabla 2.5, por lo que estos se toman como referencia para el diseño del horno.

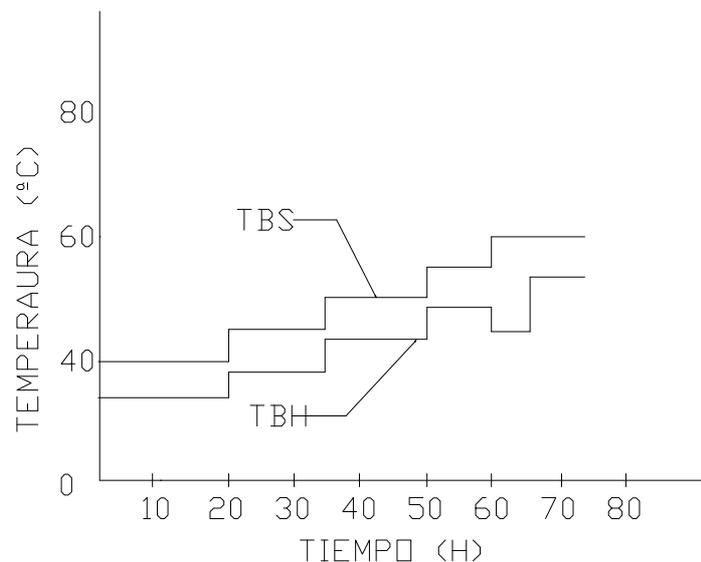


Fig.2.12 Programa de secado de madera – JUNAC

Tabla 2.5 Programas de secado de madera de la JUNAC

Programa de secado suave

Tiempo Horas	Temperatura °C		HR (%)
	TBS	TBH	
10	40	37	82
30	40	35	72
30	45	37	60
30	50	40	54
30	55	42	46.5
30	55	37	32
160			

Programa de secado moderado

Tiempo Horas	Temperatura °C		HR (%)
	TBS	TBH	
10	50	47	83
20	55	49	70
30	60	51	61
30	65	52	50
30	70	54	44
120			

Programa de secado fuerte

Tiempo Horas	Temperatura °C		HR (%)
	TBS	TBH	
10	60	56	81
20	65	58	70
20	70	60	61
20	75	61	51
20	80	62	43
10	85	60	30
100			

2.6 Procesos de secado.

Este proceso tiene dos partes bien diferenciadas caracterizadas por la velocidad de secado de la madera como se muestra en la figura 2.13. En la primera de ellas la velocidad de secado permanece invariable por lo que se llama etapa de velocidad constante, donde se elimina el agua libre almacenada. Como ésta agua está atrapada en las cavidades interiores y el lumen de las células por fuerzas de capilaridad muy débiles sale con relativa facilidad y a velocidad constante.

La segunda parte se caracteriza porque la velocidad se reduce linealmente, por lo que es llamada etapa de velocidad decreciente. En ella se elimina el agua de saturación de las paredes celulares, que sale por difusión. El secado de la superficie no es uniforme si no que unas partes se secan antes que otras por lo que se va reduciendo el área de secado, y aún cuando la velocidad de difusión no cambia, esto causa una reducción de la cantidad de agua evaporada que significa una reducción paulatina de la velocidad de secado hasta cero cuando toda el agua se ha eliminado y la madera queda anhidra. La velocidad de secado de la madera se determina con:

$$N_s = 10^3 P_s \cdot \frac{X_1 - X_2}{A_s \tau} \quad (2.7)$$

N_s = velocidad de secado, g /s.m².

X_1 = contenido de humedad inicial, kg de agua / kg de madera seca

A_s = Superficie de secado, m².

τ = Tiempo de secado, s

P_s = Peso seco de la madera, kg / m³.

$$P_s = \frac{\gamma \cdot V}{1 + \frac{X_1}{100}} \quad (2.9)$$

Se puede considerar que en promedio:

$$P_s = 2,265 \text{ kg} / \text{m}^3. \quad (2.10)$$

La caída de temperatura del aire se determina por un balance de calor del proceso adiabático, igualando el calor cedido por el aire con el calor utilizado por el agua para evaporarse, entonces:

$$m_a C_p \Delta T = N_s A_s h_{f/g} \quad (2.11)$$

m_a = flujo másico del aire, kg/s

C_p = del aire

$h_{f/g}$ = Calor latente de vaporización del agua

$$\Delta T = \frac{h_{f/g}}{C_p} \cdot \frac{N_s}{m_a} (A_s) \quad (2.12)$$

$$\Delta T = 10^3 P_s \frac{h_{f/g}}{C_p} \frac{X_1 - X_2}{\tau m_a} \quad (2.13)$$

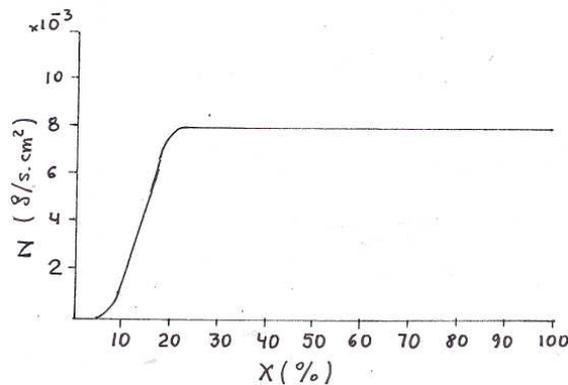


Fig. 2.13 Velocidad de secado de la madera

CAPITULO III

DEMANDA DE MADERA SECA Y SELECCIÓN DEL HORNO

3.1 USO DE MADERA Y CALIDAD REQUERIDA.

3.1.1 Uso

La madera para nuestro caso específico se aplicará como materia prima para fabricar carretes para conductores eléctricos de cobre.

3.1.2 Calidad requerida.

Para la aplicación del proyecto se consideran:

3.1.2.1 Densidad de la madera.

Se requieren maderas con densidades comprendidas entre 0,72 y 0,88 gr/cm³ que son maderas medianas o medianamente pesadas.

3.1.2.2 Especies.

Se utilizan las especies de origen amazónico, maderas tropicales, que se presentan en la tabla 3.1.

3.1.2.3 Dimensiones.

Los carretes son de diferentes tamaños y tienen el diseño básico que se muestra en la Fig. 3.1 Las dimensiones de los tablones requeridos se

muestran en la tabla 3.2 en concordancia con la Fig. 3.1. Se requieren tablonces de tres espesores y cuatro longitudes diferentes y no existe restricción en cuanto al ancho del tablón.

Tabla 3.1 Especies de maderas aptas para fabricar carretes

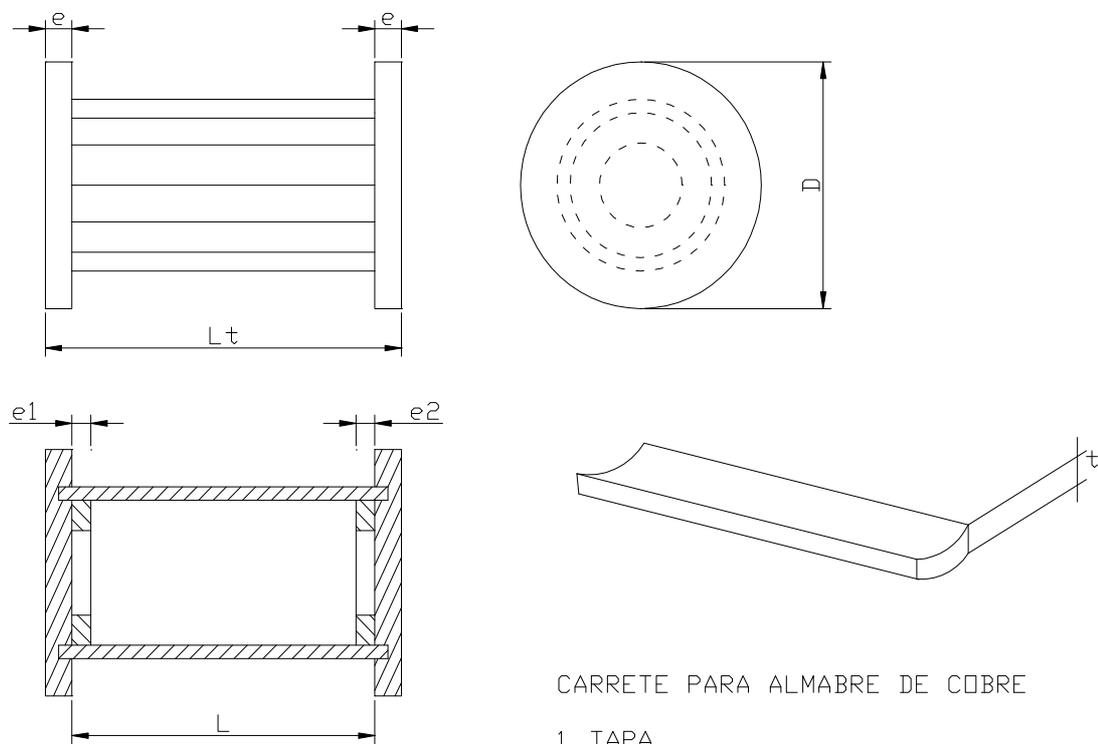
Espece	Densidad básica gr/cm ³	Peso seco por 1000 pt Kg
Chimicua colorada	0,71	1670
Yacuspana	0,73	1723
Estoraque	0,74	1747
Pashaco negro	0,79	1865
Quinilla colorada	0,85	2006

3.1.2.4 Humedad requerida

La madera seca debe tener una humedad del 15%. Cabe señalar que la humedad de equilibrio de Pucallpa es de 14 % y la de Lima 15 %.

Tabla 3.2 Dimensiones de tablonces para carretes

Espesor		Longitud m	Ancho Estimado
pulg.	mm		
1"	25,4	2,50 2,70	Variable
1 ½"	38,1	2,90 4,10	
2"	50,8		



CARRETE PARA ALMABRE DE COBRE

1. TAPA
2. ARANDELA
3. CILINDRO

NOTA:

Para $L > 0.93$ m. se adiciona una arandela ventral

Fig. 3.1 Dimensiones de los carretes para alambre de cobre

3.2 DEMANDA

La demanda es la cantidad de pies tablares de madera requeridos para fabricar los carretes. Su proyección semanal prevista se muestra en la tabla 3.3. La demanda mensual será de 288 972 Pt.

Tabla 3.3 Demanda semanal de madera seca

DIÁMETRO EXTERIOR (cm)	VOLUMEN UNITARIO POR CARRETE (Pt.)	DEMANDA SEMANAL (Pt.)
60	15,72	6 602
76	23,75	8 550
90	43,37	7 806
93	70,27	8 432
100	60,79	7 294
120 E	127,55	15 306
120	92,37	11 084
180	302,60	7 000
TOTAL		72 073

. La demanda mensual será de 288 972 Pt. Y como la capacidad actual de secado es de 200 000 Pt. mensuales, el déficit previsto que es la demanda por cubrir es:

Demanda prevista: 288 972 Pt.

Capacidad actual 200 000 Pt.

Demanda por cubrir: 88 972 Pt.

3.3 CONDICIONES CLIMÁTICAS.

Las condiciones climáticas de la zona de ubicación del horno, que será la ciudad de Pucallpa, según el SENAMHI son:

Tabla 3.4 Clima de la zona de Pucallpa

Temperatura promedio anual	(°C)	21,6
HR Promedio anual	(%)	75
Humedad de equilibrio	(%)	14,6

3.4 INSTALACIONES DISPONIBLES.

Se cuenta con una edificación de base cuadrada, de 9,90 x 10,65 m, con paredes de 4,82 m y techo aligerado de concreto. Las paredes son de ladrillo tipo king kong colocados de soga recubiertos con tarrajeo de cemento. Tiene columnas de concreto y piso de cemento. El eje del edificio tiene una orientación norte-sur; con dos puertas de 3,80 m de ancho, en el frente una y otra en la parte posterior, así como 4 ventanas, en cada pared este y oeste.

Fue construido en 1 990 como almacén de productos terminados de madera aserrada, por lo que su actual estado de conservación es bueno. Este edificio se encuentra ubicado en el interior de un área de 20 x 15 m que tiene un cerco perimétrico de 2,40 m de altura.

Los detalles del edificio se muestran en la Fig. 5.3. Se cuenta con un suministro de energía eléctrica con una potencia disponible de 180 kW así como una línea de suministro de agua potable.

3.5 SELECCIÓN DEL TIPO Y CAPACIDAD DEL HORNO.

3.5.1 Tipo del horno.

Se deben secar 88 972 Pt. mensuales, y por las características de la madera se tienen que aplicar programas de secado moderados, con 120 horas de permanencia de la madera en el horno. Se descarta usar un horno tipo túnel adecuado para capacidades de producción mayores, y se decide usar un horno tipo bach y construirlo adaptando el local existente.

3.5.2 Capacidad.

Para determinar la capacidad del horno se considera que este debe cubrir la demanda actual, con un margen de seguridad no menor al 30%, que además sirva como respaldo para un futuro crecimiento de la demanda.

Esta se expresa como:
$$C_H = \frac{P_m}{\eta_0} \quad (3.1)$$

C_H = Capacidad nominal del horno, pt.

P_m = Producción mensual de horno, pt.

η_0 = Número de operaciones bach al mes.

Se utilizarán programas moderados de 120 horas, a lo que se debe sumar el tiempo de carga, calentamiento inicial y enfriado posterior con una duración total de aproximadamente 40 horas por lo que para diseño se toma una duración de 160 h , que representan 7,5 días de trabajo, con lo que resultan un máximo 4 operaciones mensuales del horno. Para tener un margen de seguridad se asume que solo será posible realizar 3 operaciones mensuales, por tanto:

$$P_m = 88\ 972 \text{ pt.} \quad (3.2)$$

$$\eta_0 = 3 \quad (3.3)$$

y reemplazando en (3.1)

$$C_H = \frac{88972}{3}$$

$$C_H = 29\,657 \text{ pt.}$$

Por lo que se toma como capacidad nominal del horno:

$$C_N = 30\,000 \text{ pt.} \quad (3.4)$$

La capacidad real mensual de producción, considerando que puede realizar hasta 4 operaciones por mes, se obtiene con:

$$P_M = C_N \cdot \eta_M \quad (3.5)$$

P_M = Capacidad máxima de producción mensual, pt.

C_N = Capacidad nominal, pt.

η_M = Número máximo de operaciones mensuales.

Considerando el máximo número de cuatro operaciones mensuales, reemplazándola capacidad de 3.4 en la expresión 3.5 se tiene:

$$P_M = 30\,000(4) \quad (3.6)$$

$$P_M = 120\,000 \text{ pt.} \quad (3.7)$$

El margen de seguridad de producción del horno con respecto a la demanda será:

$$M_{Sp} = \left(\frac{P_M - P_m}{P_m} \right) 100 \quad (3.8)$$

M_{Sp} = margen de seguridad de producción %

Reemplazando los datos en 3.8:

$$M_{Sp} = \frac{120\,000 - 88\,972}{88\,972}$$

$$M_{Sp} = 34,87 \% \quad (3.9)$$

Este margen de seguridad es mayor al mínimo requerido, por lo que la capacidad resulta adecuada. La carga mínima con que debe operar el

horno para cubrir la demanda de secado operando el número máximo de operaciones posibles al mes se obtiene reemplazando 3.2 y 3.5 en 3.1:

$$C_m = \frac{88972}{4}$$

$$C_m = 22\,243 \text{ Pt.} \quad (3.10)$$

El porcentaje de carga respecto a la capacidad nominal del horno es:

$$P(\%) = \frac{C_m}{C_M} \times 100 \quad (3.11)$$

$P(\%)$ = Porcentaje de carga.

$$P(\%) = \frac{22\,243}{30\,000} \times 100$$

$$P(\%) = 74,14 \% \quad (3.12)$$

Como el horno opera como mínimo al 90% de su capacidad nominal, siempre cubre la demanda mensual de secado de madera. En resumen, se tiene:

Demanda	:	88 972 pt/mes.
Tipo de secado	:	Programas moderado de JUNAC
Horno seleccionado	:	
Tipo	:	Bach de alta temperatura
Capacidad	:	30 000 pt/bach.
Producción mensual	:	90 000 pt/mes.
N° de operaciones/mes	:	3
Máxima capacidad	:	120 000 pt/mes.

CAPITULO IV

TECNOLOGÍAS DE HORNOS DE ALTA TEMPERATURA

4.1 Tecnologías disponibles

En la actualidad existen diferentes tecnologías para resolver el problema del secado con hornos de alta temperatura, resultando diferentes tipos de hornos con variados grados de sofisticación.

Como en el capítulo anterior se seleccionó un horno tipo bach, el tema de la tecnología se centra en este tipo de hornos. Como se trata de adaptar ésta tecnología al caso particular de un horno con características condicionadas por el local existente se pone énfasis en la tecnología de diseño.

La tecnología de utilización o explotación de los hornos queda en el campo de la biología o ingeniería forestal, pero el conocimiento de la forma como se desarrolla el secado resulta importante para fijar algunos parámetros de diseño en sus valores óptimos y también para determinar la forma como deben ser monitoreados y controlados. Teniendo en cuenta niveles de tecnología creciente, se tienen los siguientes tipos de hornos.

4.1.1 Hornos sin recirculación de aire

4.1.1.1 Sin recalentamiento de aire

Son muy sencillos, Fig. 4.1. El aire exterior en la condición 0 es impulsado por un ventilador a, sobre el calentador b, y pasa por la pila de

madera c , y es arrojado al exterior en la condición 2. En estos hornos se controla la temperatura de aire, en el sistema de calentamiento del aire. No se realiza ningún otro control.

Esta sencillez constructiva tiene la desventaja de un alto desperdicio de energía, pues elimina aire caliente que además puede tener capacidad de secado pues lo elimina este saturado o no.

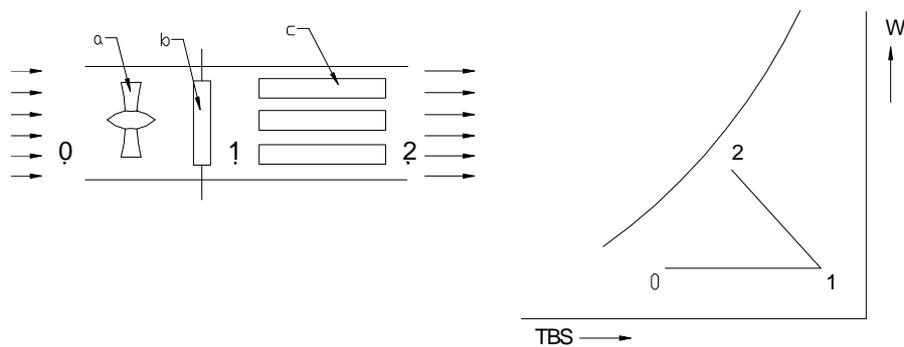


Fig.4.1 Hornos sin recirculación ni recalentamiento de aire.

4.1.1.2 Con recalentamiento.

Los equipos e instalaciones requeridos son los mismos que los anteriores, a los que se debe añadir un banco adicional de calefacción b del

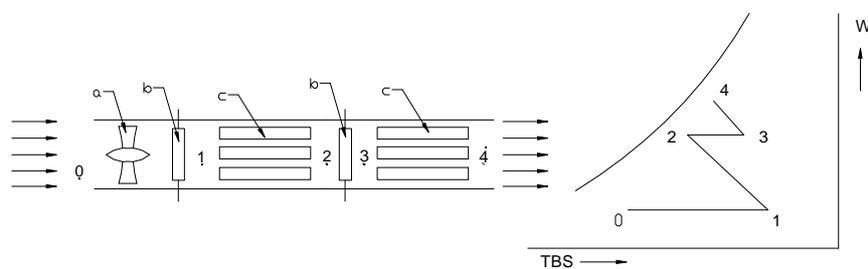


Fig. 4.2 Hornos sin recirculación y con recalentamiento de aire.

aire. En este caso, una vez que el aire ha salido de una pila se recalienta en b, de modo de utilizar mejor su capacidad de secado. Figura 4.2. Se produce un ahorro de energía porque el aire solo se calienta de 2 a 3, con menor energía que de 1 a 2. Pero requieren de espacio suficiente para colocar los calefactores entre las pilas.

4.1.2 Hornos con recirculación y sin recalentamiento de aire

En este modelo, el aire recircula por el interior del horno, en circuito cerrado. Fig. 4.3. Al secar la madera el aire aumenta su contenido de humedad y se enfría reduciendo su capacidad de secado. Para compensar esto, se reemplaza una cantidad de este aire, eliminándolo por unas ventilas y captando aire fresco que ingresa por otras ventilas. Esta mezcla se recalienta y repite el ciclo de secado.

Esta forma de operación permite un óptimo uso de la energía, pues solo se elimina un porcentaje generalmente inferior al 10 % de aire caliente y solo se calienta el aire fresco de renovación. Se controlan la temperatura del aire, su humedad relativa, y su velocidad de paso por las pilas de madera.

Por estas ventajas se adopta como horno, uno con recirculación y sin calentamiento de aire, por limitaciones de espacio para el horno.

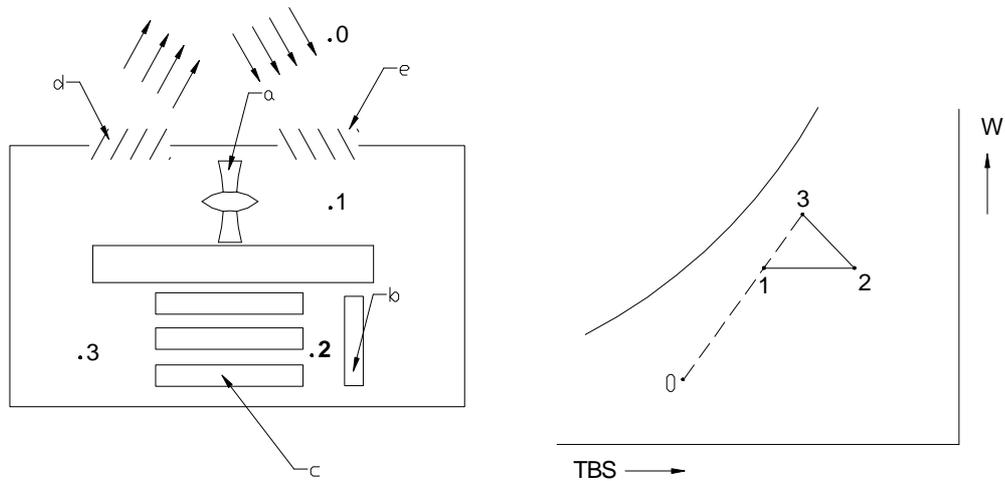


Fig. 4.3 Hornos con recirculación y sin recalentamiento de aire.

4.2 Descripción general de un horno

Los hornos tienen la forma de un paralelepípedo rectangular, formado por paredes exteriores que limitan y aíslan su interior de los cambios climáticos exteriores. Su ambiente principal es la cámara de secado, donde se ubica la madera, alrededor de la cual se ubican sus componentes, equipos e instalaciones formando una unidad compacta. Los hornos comerciales son modulares con componentes pre-fabricados normalizados. Los componentes principales de un horno, tal como se muestra en la figura 4.4, son:

- 1.- Cubierta exterior, con aislamiento térmico para reducir pérdidas de energía.
- 2.- Cámara de secado, de dimensiones apropiadas para almacenar las pilas de madera.
- 3.- Sistema de circulación de aire, conformado por uno o más ventiladores, ductos y accesorios.
- 4.- Sistema de calentamiento de aire.

- 5.- Sistema de control de humedad del aire, constituido por ventilas de admisión y purga de aire, para reducción de humedad; y humidificador de aire para elevarla.
- 6.- Sistema de control, con dispositivos de monitoreo, mando y maniobra, de los principales parámetros del secado.
- 7.- Instalaciones y equipos auxiliares o complementarios.

Los detalles de cada componente se describen a continuación.

4.3 Cubierta exterior

Esta formada por las paredes y puertas, el techo y el piso del horno. Su

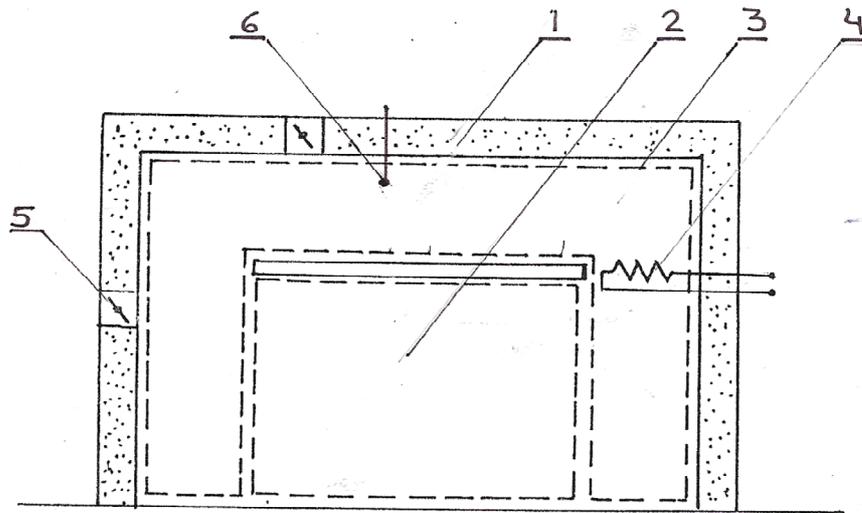


Fig. 4.4 Componentes principales de un horno

función es reducir las pérdidas de calor y evitar que varíen las condiciones climáticas interiores por lo que deben tener dos características principales:

- Ser resistente a la intemperie, es decir, con resistencia mecánica y adecuada para soportar la radiación solar y la lluvia.

- Ser un buen aislante térmico, porque el interior del horno tendrá una temperatura superior a la del medio ambiente. Según los programas de secado esta temperatura oscila entre los 50 y 75 °C, con una diferencia de temperatura de 35 a 55 °C con respecto a la temperatura exterior, y esto por largos períodos de tiempo.

También se debe considerar que en casos de corrección de fallas de la madera por secado, se deben mantener en el interior del horno, temperaturas mayores, aunque por cortos períodos de tiempo.

Las puertas y ventanas deben tener cierre hermético para evitar fugas de aire caliente al exterior.

El techo tiene las mismas características que las paredes, mientras que el piso no requiere de aislamiento térmico, pero si debe ser resistente a la humedad.

4.4 Cámara de secado

Es el ambiente donde se colocan las pilas de madera que se van a secar. Su ubicación debe ser apropiada para que permita una circulación transversal del aire de secado.

Las dimensiones de la cámara, según recomiendan algunos fabricantes, tiene en la dirección transversal, entre las pilas y las paredes un espacio mínimo de 0,60 m para la circulación de personas, y el intersticio o luz entre la parte superior de una pila y el techo, debe ser menor a 0,05 m.

El ancho máximo de la cámara está limitado por la distancia que el aire que atraviesa las pilas, lo haga sin excesivas pérdidas de presión, o que se reduzca excesivamente su capacidad de secado, aunque esto puede

compensarse colocando un sistema de calentamiento intermedio entre las pilas de madera.

Los límites físicos de la cámara de secado son el piso, el falso techo y las paredes frontal y posterior con las puertas de ingreso y salida. No tiene paredes laterales porque por esos lados ingresa y sale el aire.

4.5 Sistema de circulación de aire.

Su función es hacer circular aire en el interior del horno y está formado por los ventiladores, ductos, codos y accesorios para conducción del flujo.

4.5.1 Ventiladores

Los ventiladores tienen la función de hacer circular el aire en el interior del horno, de modo que en la cámara de secado siempre tenga la velocidad óptima requerida, para lo cual debe suministrar en su punto de ubicación el caudal necesario con la presión suficiente para compensar las pérdidas.

4.5.1.1 Características

Los ventiladores deben tener las siguientes características:

- Ser de tipo axial, debido a que manejan caudales relativamente grandes con baja alturas de presión.

- Ser de caudal regulable, porque el caudal que suministren puede variar según la carga de madera a secar y las temperaturas de operación del horno.

- Deben poder operar ambientes con temperaturas hasta de 100°C.

- Ser de tipo placa pues van montados en una pared o placa vertical ubicada en el interior del horno

- Deben ser accionados por un motor eléctrico capaz de operar en ambientes de 70 ° C.

- Deben ser reversibles, es decir poder invertir el sentido del flujo. Para mejorar y reducir el tiempo de secado se invierte cada 6 horas el sentido del flujo de aire porque los extremos de los listones que están al final del recorrido del aire se secan menos que los que están al comienzo. La inversión el flujo hace que estos queden al inicio, lo que uniformiza el secado.

4.5.1.2 Ubicación

En el interior del horno los ventiladores se pueden ubicar en varios lugares, aunque existen las ubicaciones típicas siguientes:

a) Ventiladores ubicados sobre las pilas

Los ventiladores están sobre las pilas de modo que el aire las atraviese en su dirección transversal. Existen 2 variantes:

- Ventiladores ubicados directamente sobre las pilas

Los ventiladores se ubican en la cámara de secado sobre las pilas de madera, lo que causa irregularidades en el flujo, por lo que este sistema se usa muy poco. Fig. 4.5 a.

- Ventiladores ubicados sobre las pilas, separado por un falso techo.

Los ventiladores se instalan sobre un falso techo de la cámara de secado que se ubica sobre las pilas, en un ducto de sección rectangular formado por éste, el techo y las paredes del horno. Fig. 4.5.b.

El flujo de aire, impulsado por los ventiladores, circula por el ducto superior y luego de arriba hacia abajo por el codo y ducto de ingreso a la cámara, atraviesa las pilas y sale por el ducto vertical y codo de salida e ingresa de nuevo al ducto superior cerrando el circuito a través de los

ventiladores. Para mejorar la conducción y distribución del flujo en las pilas de madera se pueden colocar álabes deflectores fijos que guían el flujo de aire en la entrada y salida de las pilas. Si hay inversión del flujo se puede utilizar una disposición simétrica.

Los motores eléctricos de los ventiladores se pueden conectar directamente a ellos en el interior del horno y en este caso deben cumplir con la norma IP 64 para temperaturas de 60 a 100 ° C y se debe sobredimensionar su potencia nominal para reducir el calentamiento de sus bobinados.

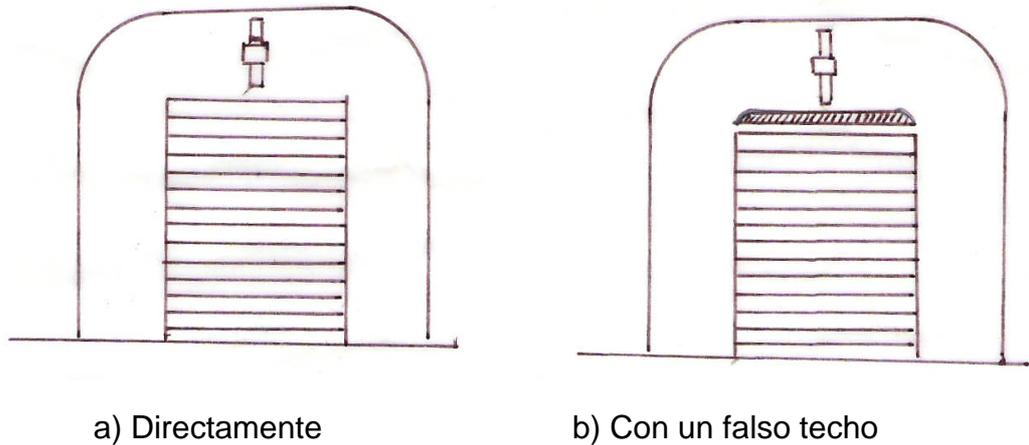


Fig. 4.5 Ventilador ubicado sobre la pila

b) Ventiladores ubicados en la sección lateral de la cámara de secado.

Los ventiladores se ubican en el lado de ingreso del aire a la cámara, de modo que lo impulsen directamente a las pilas de madera.

Su desventaja es que resulta difícil tener un flujo uniforme sobre las pilas de madera, pues aunque los ventiladores tengan un gran diámetro

siempre quedan espacios fuera de la corriente de aire por lo que se descarta esta alternativa. Fig. 4.6.

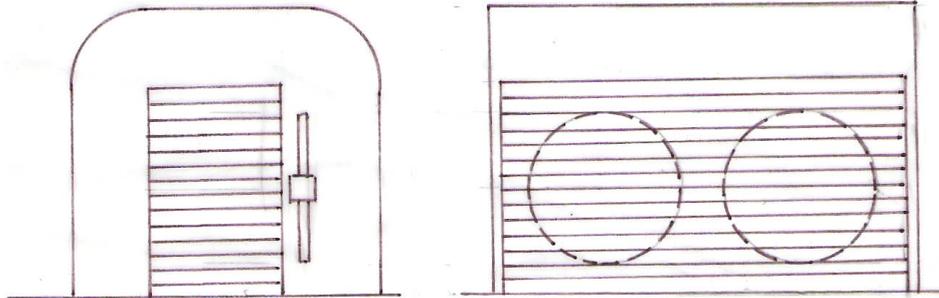


Fig. 4.6 Ventiladores ubicados en la sección lateral

4.5.2 Ductos y codos

Los ductos y codos los forman las paredes y techo del horno, por lo que son de sección rectangular. Por ser el horno compacto sus longitudes son también cortas, con codos cortos de 90° y como el flujo circula en la dirección transversal, a lo largo del horno, estos ductos tienden a ser estrechos. El ingreso a la cámara de secado es un ducto de características particulares, pues es un codo a 90° , pero su sección de salida a la cámara de secado es tan grande con respecto a su sección de ingreso que funciona como un ducto con caudal variable, debido a que este disminuye al ir entrando en la cámara de secado.

4.5.3 Ventilás

Son compuertas tipo mariposa de sección circular que sirven para eliminar el aire húmedo y permitir el ingreso del aire de renovación. Las primeras se ubican en el ducto vertical de salida de la cámara de secado y

las otras inmediatamente antes de la succión de los ventiladores, de modo que el aire ingrese por la diferencia de presiones entre el exterior y la depresión producida por la succión del ventilador.

Estas ventilas, son metálicas, a prueba de intemperie y tiene accionamiento manual o automático.

4.6 Sistema de calentamiento de aire

Su propósito es dar calor sensible al aire de secado para compensar la reducción de temperatura producida por el secado y la mezcla con el aire fresco de reposición, hasta alcanzar la temperatura del programa de secado y mantenerla el tiempo señalado en este programa. Algunas configuraciones de éste son:

4.6.1 Sistema de Vapor

El aire se calienta por vapor que circula en el interior de tuberías que generalmente se ubican en la salida del codo de ingreso a la cámara de secado y algunas veces y a la entrada del codo de salida del ventilador.

Existen 2 opciones:

- Vapor a baja presión, con presiones del vapor menores a 15 psi, para secado a baja temperatura de maderas latifoliadas, rentables para instalaciones de 150 a 200 HP.

- Vapor a alta presión, con presiones del orden de 150 psi, y temperaturas hasta de 115 °C. Se puede realizar un control preciso y rápido de la temperatura.

Estas opciones requieren contar con calderos y todo su equipo asociado, por lo que su uso solo es recomendable cuando la instalación es muy grande o se cuenta con estos equipos.

4.6.2 Agua caliente a baja presión

Sus características son similares a las de los calderos de baja presión, pero resultan más costosas por la necesidad de usar tuberías de mayor diámetro que el caso del vapor.

4.6.3 Intercambiadores a gas

Son convenientes para secado a alta temperaturas y existen 2 opciones.

4.6.3.1 Intercambiadores a GLP

Tiene la ventaja de operar a bajas presiones porque el GLP tiene un alto poder calorífico. Su costo es relativamente bajo pero tiene el riesgo de fuego directo y su uso depende de la disponibilidad del GLP.

4.6.3.2 Intercambiadores a GNC

Donde está disponible tiene la ventaja de su bajo costo, pero tiene la desventaja de su alto costo de instalación. Se debe tener en cuenta a la hora de seleccionar el equipo de calentamiento, sobre todo en instalaciones de gran capacidad.

4.6.4 Sistemas eléctricos

Es un sistema muy versátil, fácil de instalar, operar y de bajo mantenimiento. También resulta muy sencillas la variación y el control de temperaturas.

Las resistencias eléctricas se ubican a la salida de los ventiladores o codos, formando bancos de resistencias compactos, fáciles de manipular.

4.6.5 Otros sistemas

De calentamiento directo, con calentamiento de aire con gas o combustión de los residuos de madera, lo que podría resultar menos costoso. Otra alternativa es el calentamiento indirecto del aire. Con aceite

térmico, calentado por residuos de madera o gas. Se calienta el agua o produce o vapor para a que su vez estos calienten el aire con radiadores adecuados.

4.7 Sistemas de medición, control y monitoreo

Tienen el objetivo de medir los parámetros del proceso de secado, controlarlos y tener un registro de ellos durante todo el proceso con la finalidad de garantizar una buena calida de madera seca. El sistema de medición debe medir:

La TBS y alternativamente, la TBH o la HR del aire de secado en diferentes puntos del horno. La TBS se mide con termómetros adecuados que permitan una lectura confiable de esta temperatura. La humedad relativa se puede medir con instrumentos de lectura directa de este parámetro o hacerlo por medio de la medición de TBH y relacionando esta, con la TBS obtener la humedad relativa. Se miden a la entrada de la cámara de secado.

La velocidad del aire en la cámara de secado.

El sistema de control debe controlar:

- El flujo de aire para optimizar el programa de secado, controlando la posición de los álabes regulables de los ventiladores.

- El calor introducido al horno, lo que dependerá del sistema de calentamiento. Si es por vapor la temperatura y flujo de vapor, y si es eléctrico, la tensión y la corriente de las resistencias eléctricas de calentamiento. Se compara la TBS del horno con la TBS del programa de secado. Esta diferencia determina del encendido o apagado del sistema de calefacción.

- La apertura de las ventilas para tener una adecuada renovación de aire. La apertura o cierre depende de la diferencia entre la HR del aire y la establecida en el programa de secado.

-El contenido de humedad de la madera, con las pruebas correspondientes.

Se deben monitorear los parámetros medidos con instrumentos registradores para poder establecer una correlación entre el funcionamiento del horno y las fallas que se puedan producir en la madera con la finalidad de establecer las medidas correctivas y evitar costosas pérdidas.

4.8 Sistemas de complementarios

Los sistemas complementarios son el sistema eléctrico de accionamiento de los motores de los ventiladores y la iluminación interior y exterior del horno y el sistema de generación de vapor para humidificar el aire en la etapa de arranque o para corrección de fallas.

4.9 Pilas de madera

Para lograr un secado uniforme los listones de madera deben quedar inmersos en la corriente de aire, de modo que su superficie en ambas caras quede en contacto con el aire de secado, figura 4.7. Para conseguir este efecto los listones se colocan en una rejilla con sus caras paralelas al flujo de aire de secado, figura 4.8.

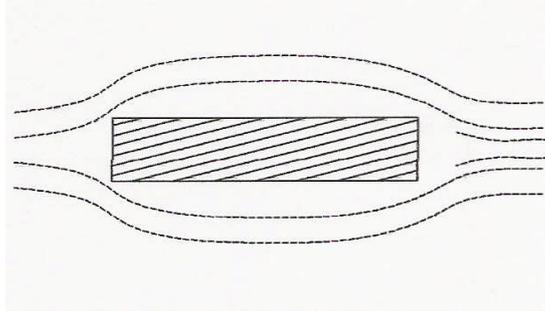


Fig. 4.7 Listón de madera sumergido en la corriente de aire

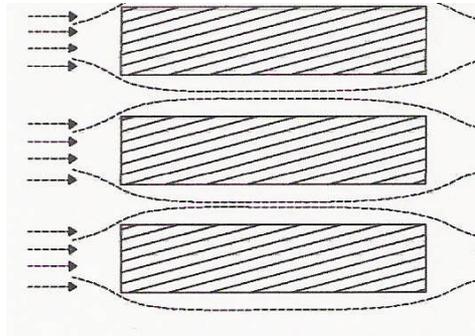


Fig. 4.8 Rejilla de listones de madera en la corriente de aire.

Para tener físicamente este arreglo, además de los listones que se van a secar, se utilizan pequeños listones separadores que pueden ser de madera seca u otro material, figura 4.9, los que se ubican en posición horizontal, en capas sucesivas de listones a secar en dirección longitudinal y listones separadores en dirección transversal, unas sobre otras, como se detalla en la figura 4.10 formando una pila como se muestra en la figura 4.11, según las distancias y dimensiones de la tabla 4.1

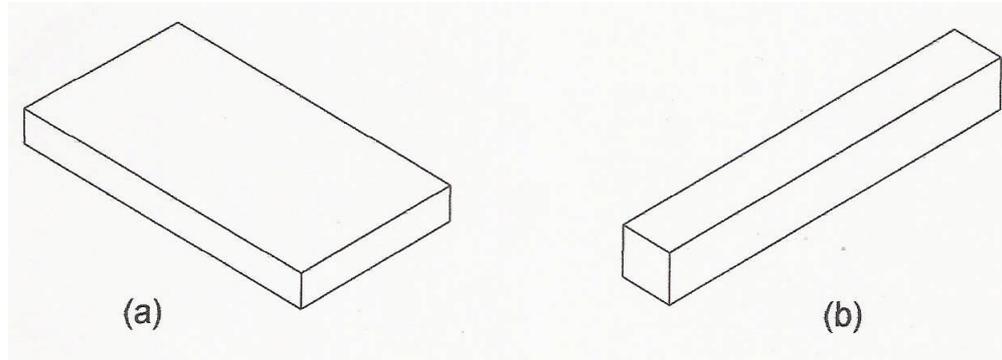


Fig. 4.9 Listón de secado (a) y listón separador (b)

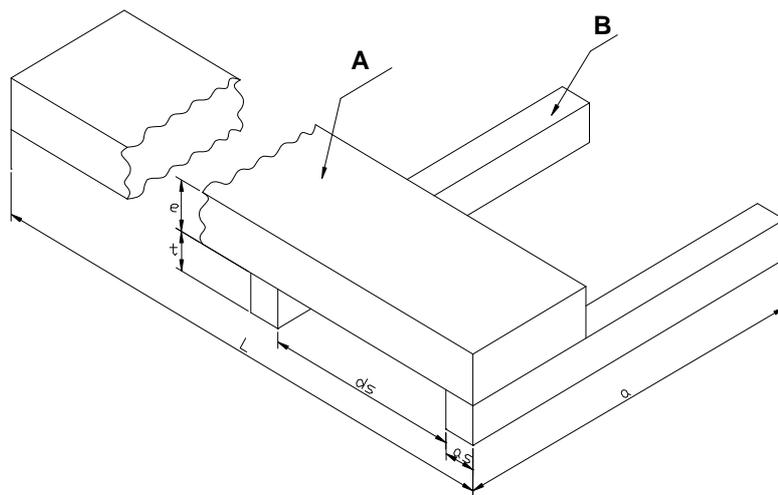


Fig. 4.10 Detalle de ubicación de los listones en una pila de madera.

TABLA 4.1 Dimensiones de tablonés y distancia entre listones
separadores en pilas

Espesor del listón secado (e)		Listón separador		Distancia entre separadores (d)
mm	Pulg.	Altura (t) mm	Ancho (As) mm	
< 20-30	< 0,787	5	15	400-500
30-40	0,78 - 1,184	15	15	550-600
40-60	1,181 - 1,574	20	20	600-650
60-80	1,574 - 2,362	25	25	650-700
>80	2,362 - 3,149	30	30	700-800
	> 3,149	10	40	800-1000

(*) Maderas latifoliadas

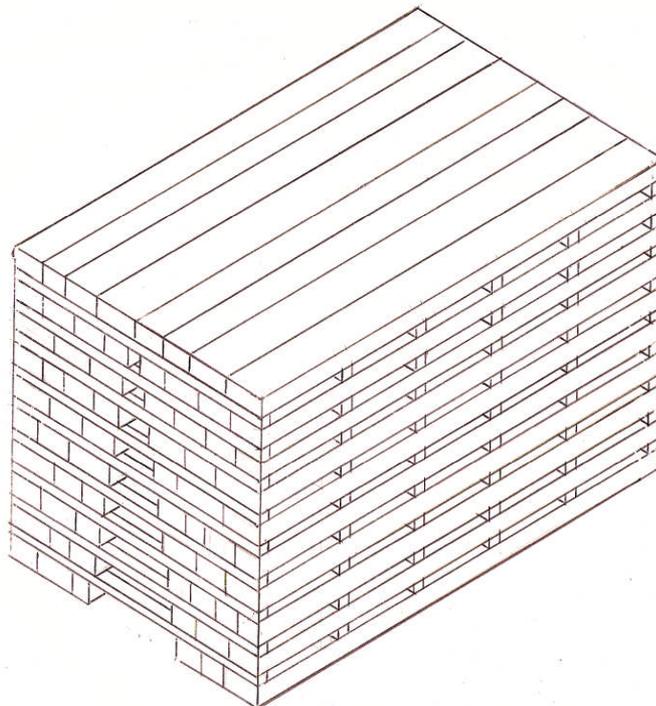


Figura 4.11 Pila de listones de madera para secado

4.10 Programas de secado

Para efectos de diseño se toman como base los programas de secado recomendados por la Junta del Acuerdo de Cartagena, JUNAC mostrados en la tabla 2.6.

4.11 Procesos del secado

Los procesos que se realizarán en el horno cuando se aplique un programa son los siguientes:

Cargado de los listones de madera en los carrito porta pilas, e introducción en la cámara de secado.

Calentamiento del horno, desde la temperatura ambiente hasta 50 ° C del periodo inicial del programa moderado. Se realiza con las ventilas cerradas, por lo que no hay flujo másico al exterior. Se suministra calor para calentar los componentes del horno, el aire interior y las pilas de madera

Proceso de secado que para el programa moderado, según la tabla 4.2 tiene cinco periodos caracterizados por las TBS y TBH del aire. Este aire circula con las ventilas abiertas para la renovación parcial del aire y se suministra el calor necesario para evaporar el agua de la madera, calentar el aire fresco de renovación y compensar las pérdidas por las paredes exteriores del horno manteniendo la TBS y TBH del aire en los valores del programa. En estos periodos se sacan las muestras de madera para ver si existen fallas y efectuar las correcciones de la TBH que sean necesarias. Para pasar de un periodo a otro, se suministra el calor necesario para aumentar la temperatura de todos los elementos del horno y la madera, hasta el valor del periodo siguiente, hasta concluir el último periodo.

El proceso que sigue es el enfriamiento del horno y concluye con la extracción de los carritos y el descargado de la madera seca.

CAPITULO V

DISEÑO DEL HORNO

5.1 Planteamiento del problema

El secado de madera depende del clima en la que la madera está inmersa, e involucra procesos de transferencia de calor y masa en la madera con cambios en sus propiedades físicas y mecánicas; y procesos psicrométricos en el aire de secado. Para tener un secado óptimo se usan hornos con climas controlados

El problema general que se debe resolver es diseñar un horno con capacidad para cubrir la demanda mensual utilizando todo o parte del local existente, lo que condiciona el tamaño del horno. Este problema general se subdivide en los problemas siguientes:

Un primer problema es determinar la capacidad del horno para que cubra la demanda de secado, lo que se resuelve con los cálculos que satisfagan la demanda y los programas de secado.

Otro problema es establecer las dimensiones del horno para que tenga la capacidad anterior y se pueda construir en el local existente. Se resuelve dimensionando la cámara de secado y las pilas, de modo que el tamaño, número y la forma en que ellas se acomoden en la cámara permitan obtener la capacidad deseada y una adecuada distribución de ductos y equipos del horno.

El problema que sigue es determinar el flujo de calor que se debe suministrar al horno para el secado de la madera, el calentamiento de sus componentes y compensar las pérdidas por la cubierta exterior.

En lo referente al secado se resuelve considerando que en la cámara de secado el aire siempre circulará a la velocidad óptima y que el secado es un proceso adiabático entre el aire y el agua de la madera con un equilibrio térmico. Se establece una relación entre las ecuaciones de flujo de calor del aire, la evaporación del agua y los procesos psicrométricos del aire con la que se determina la reducción de la humedad en cada periodo de secado y luego se ajusta la reducción de todos los periodos de modo que la suma de ellas resulte igual a la reducción total de la humedad requerida en el programa y se calcula el calor necesario para el secado. También se obtienen las temperaturas en los puntos interiores del horno.

El calor para el calentamiento de los componentes, paredes, techo, madera, etc. se suministra según lo requerido en cada periodo. Se resuelve con las ecuaciones de flujo de calor, con las C_p y los correspondientes aumentos de temperatura de cada componente.

El calor para pérdidas se resuelve diseñando un aislamiento térmico y aplicando las ecuaciones de flujo de calor, con las temperaturas interiores del horno, las características de los materiales y las dimensiones del local.

El problema siguiente es dimensionar los equipos e instalaciones, lo que se hace teniendo en cuenta los resultados anteriores. Los ventiladores se seleccionan calculando las pérdidas de presión del flujo de aire considerando a éste como un flujo interno, aplicando la ecuación de Darcy, pero como en el interior de las pilas el flujo es muy complejo los resultados de estos cálculos son aproximados y requieren de un reajuste experimental

cuando el horno opere en condiciones reales. Las resistencias de calentamiento se dimensionan de modo que suministren el calor requerido más las pérdidas.

El problema de determinar la energía requerida se resuelve con un balance de energía y se determina la eficiencia total del horno.

Finalmente, el último problema es determinar los costos de horno, lo que se resuelve cotizando los equipos e instalaciones en el mercado local.

5.2 Metodología de diseño

El horno se diseña en una edificación existente con dimensiones y características definidas. Por lo que se establece una metodología de diseño, representada en el flujograma de la figura 5.1.

Primero se determina la demanda y con el programa de secado moderado se establece la capacidad del horno, se selecciona el tipo de horno y definen sus principales características.

Luego se fijan las dimensiones de la cámara de secado que pueda secar el volumen de madera requerida, para lo cual con las dimensiones de los tablones y las recomendaciones de los fabricantes se determinan las dimensiones de las pilas y las formas posibles de acomodarlas en ella. Como resultado se tienen las dimensiones de la cámara, su ubicación en el local y la distribución de los equipos.

El diseño del horno se realiza efectuando la distribución de los equipos y las modificaciones necesarias del local.

Se realizan los cálculos térmicos, iniciándolos con el calor para el secado de la madera. Con la velocidad recomendada de 1.5 m/s para el aire y la geometría de las pilas se calcula el caudal de aire en la cámara

para el secado de la madera. Se establecen las relaciones entre la caída de temperatura del aire, y la pérdida de humedad de la madera en un periodo, luego se realiza un ajuste de la pérdida de humedad en los periodos de modo que al terminar el programa se tenga la humedad final requerida por la madera y se obtiene el calor total de secado.

Con los cálculos psicrométricos se determinan las temperaturas de los puntos interiores del horno y el porcentaje de renovación del aire. Se diseña el aislamiento térmico y se calculan las pérdidas de calor y el calor necesario para el calentamiento del horno y sus componentes. En ambos casos se tiene en cuenta la temperatura que alcanza cada uno de los componentes en el horno.

Se realizan los cálculos aerodinámicos para determinar la pérdida de presión del aire en el horno y el caudal de aire en la ubicación de los ventiladores.

Se realiza el dimensionamiento y selección de los equipos e instalaciones, los ventiladores, las resistencias eléctricas. Finalmente se realiza un balance de masa y energía, y se calcula la eficiencia total de sistema. Los problemas complementarios son el diseño del aislamiento térmico del horno, las ventilas y los carritos porta pilas. También se ubican y especifican los instrumentos de medición.

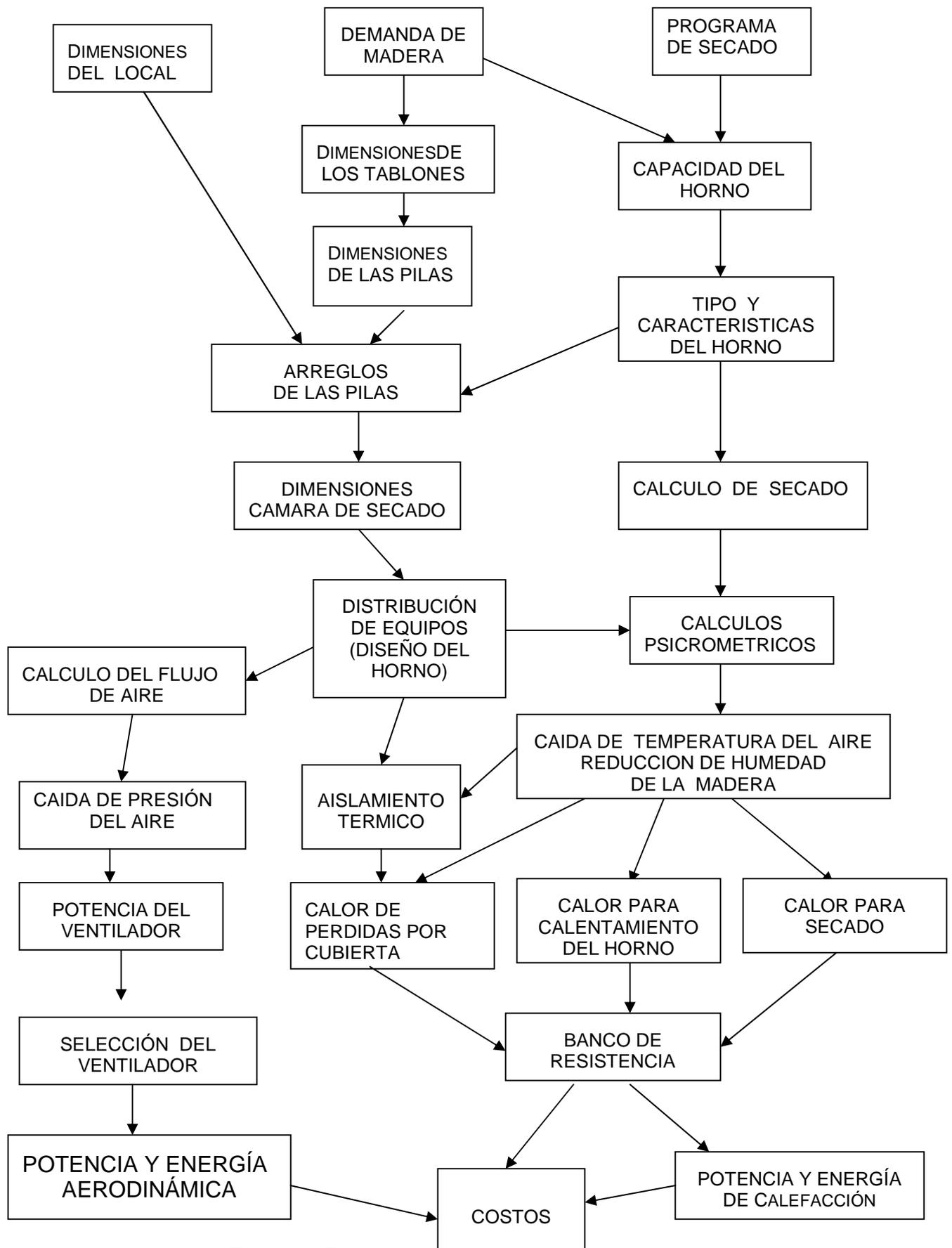


Fig. 5.1 Flujo de metodología de diseño.

5.3 Dimensiones y características del local

El local existente es una edificación de una sola planta de base cuadrada de 9,90 m x 10,60 m y 4,825 m de altura interior cuya vista isométrica se ve en la Fig. 5.2, con paredes de ladrillos y techo de cemento y puertas de madera. La edificación cuenta con columnas de concreto, dos de las cuales dividen al ambiente interno en dos zonas, tal como se muestra en la figura 5.3. La orientación de uno de los ejes es de norte-sur y se encuentra en un área rectangular de 20 x 15 m con un cerco perimétrico de ladrillo de 2.40 m de altura. Los materiales se dan en la tabla 5.1.

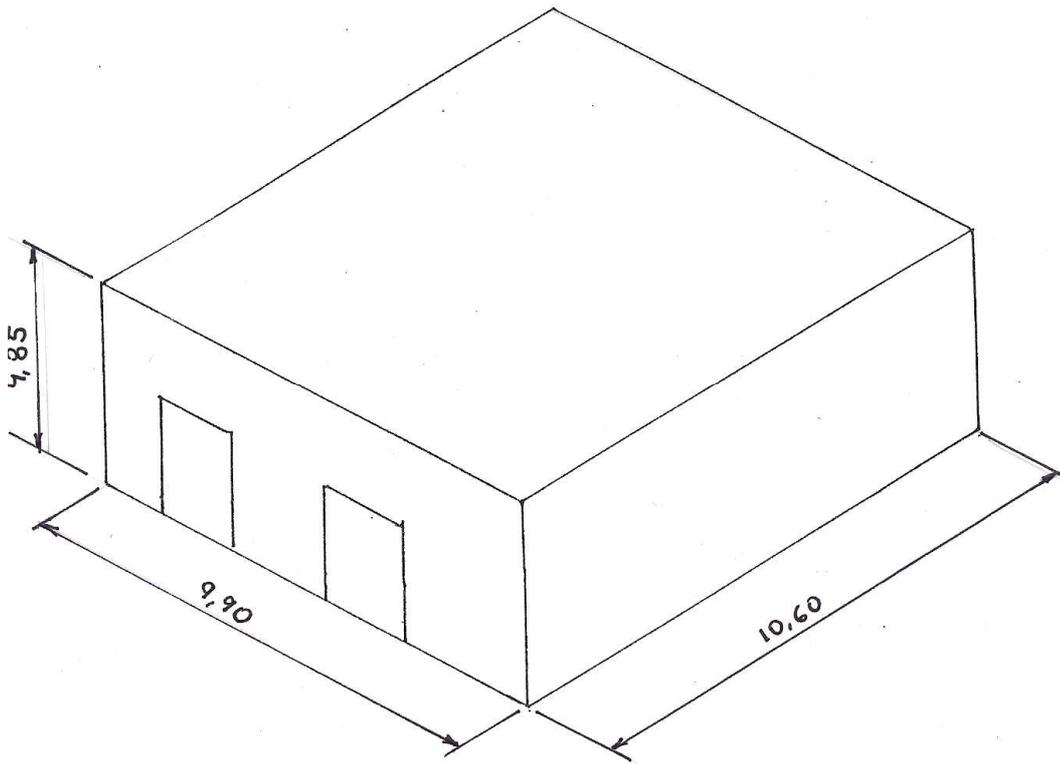


Fig. 5.2 Vista isométrica del local disponible para el horno.

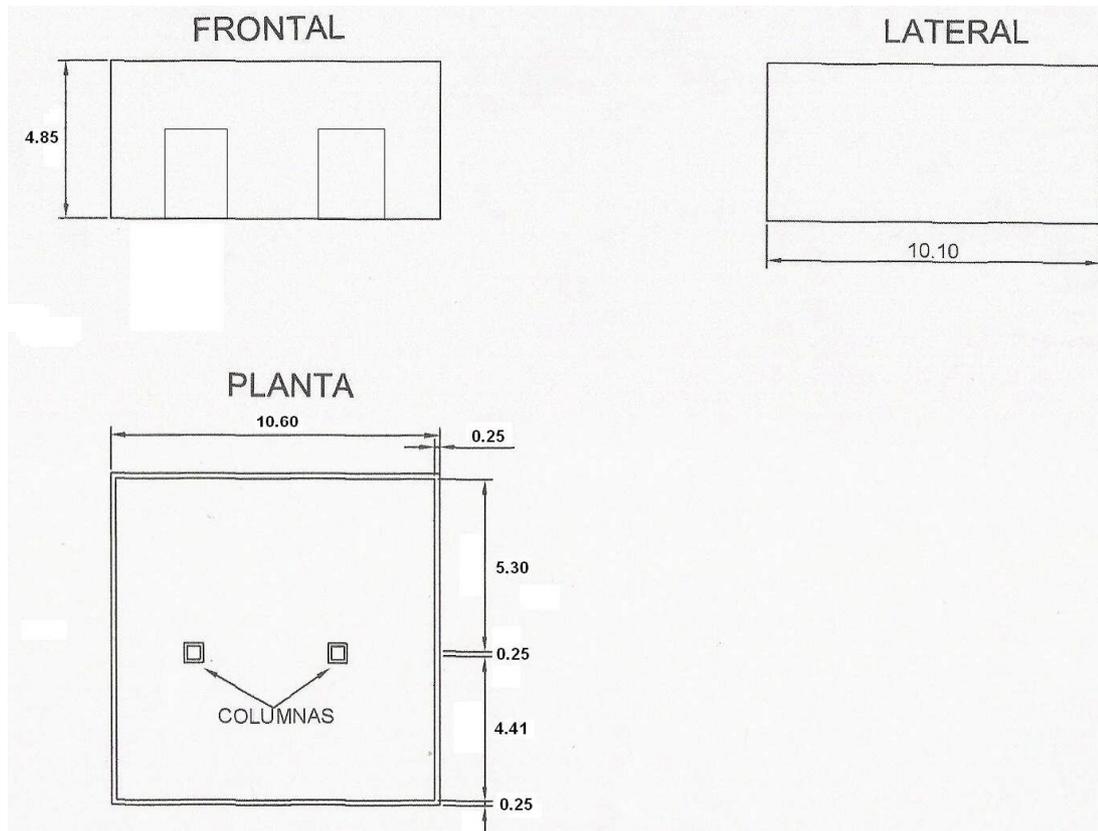


Fig. 5.3 Dimensiones del local disponible para adaptarlo como horno

Tabla 5.1 Materiales del local existente para el horno

Material		Pared			Techo	Piso	Puertas madera
		Norte/sur	Este/oeste	TOTAL			
Tipo		Muro de ladrillo			Aligerado	Loza	2 hojas
Ladrillo		KK	KK				
Aparejo		Cabeza	Soga				
Tarrajeo							
Caras		Ambas	Ambas		Ambas	Superior	
Esp.	m	0,0015	0,0015				
Densidad	kg/m ³			1800	1980	1850	890
Dimensiones exteriores							
Largo	m	5,80	10,61		10,61	9,96	5,25
Altura /ancho	m	4,83	4,83		5,80	5,80	3,80
Espesor	m	0,25	0,25		0,2	0,2	0,05
Volumen	m	32,2	12,3	26,7	61,5	57,8	1,0
Peso	kg			48099	24369	21374	45

5.4 Determinación de la capacidad del horno

La capacidad del horno depende de las dimensiones de la cámara de secado, y ésta de la forma, dimensiones y cantidad de pilas que se acomoden en su interior. Por tanto, deben determinarse unas dimensiones adecuadas de las pilas, y la forma mas conveniente de acomodarlas para que resulte una cámara de secado que se pueda construir en el local existente.

5.4.1 Dimensiones de las pilas y volumen de madera húmeda

La pila, o arreglo de los tablones de madera tienen la forma exterior de un paralelepípedo rectangular cuyas dimensiones se determinan considerando que:

- El largo queda fijado por la longitud de los listones.
- El ancho recomendado es que sea menor o igual a 1,50 m.
- La altura, queda fijada de modo que entre la parte superior de la pila y el techo quede un intersticio $i \leq 5$ cm.
- Para determinar el volumen de la madera se descuentan los intersticios y espacios libres existentes entre los listones. En el caso de la altura neta de la pila se considera solo el espacio ocupado por la madera, y en el ancho neto promedio, el real ocupado por la madera, descontándose el espacio libre que existe en el centro.

El volumen de la madera húmeda en la pila se determina con:

$$V_{MH} = H_n \cdot L \cdot a_N \quad (5.1)$$

V_{MH} = es el volumen de la madera, en m^3

L = es la longitud del listón, en m

H_n = es la altura neta ocupada por la madera, m

a_N = es el ancho equivalente de la pila, en m.

Este cálculo es iterativo, y tiene el siguiente procedimiento. En la figura 5.4 se presenta la ubicación de la pila en el interior de la cámara de secado, donde: $H_C = H_{PT} + i$ (5.2)

H_C = es la altura de la cámara de secado, m.

H_{PT} = es la máxima altura de la pila, m

i = es el intersticio entre la pila y el techo de la cámara de secado.

$$i \leq 0,05 \quad (5.3)$$

$$H_{PT} = H_P + h_c \quad (5.4)$$

H_P = es la altura de la pila, m

h_c = es la altura del carrito de soporte.

entonces:

$$H_C = H_P + h_c + i \quad (5.5)$$

En la figura 5.5 se muestra la distribución de los listones en la pila, de donde:

$$H_P = N (e + t) - t \quad (5.6)$$

reemplazando la expresión (5.6) en (5.5)

$$H_C = N (e+t) - t + h_c + i \quad (5.7)$$

Para iniciar el cálculo se asume que:

$$t = i \quad (5.8)$$

de donde resulta:

$$H_c \cong N (e+t) + h_c \quad (5.9)$$

$$N \cong \frac{H_c - h_c}{e+t} \quad (5.10)$$

Como N es el número de listones, se toma para N el máximo entero que resulta de la expresión (5.10). Como en este caso se tiene:

$$H_C = 3,80 \text{ m} , \quad e = 0,0254$$

$$t = 0,015$$

reemplazando estos valores en (5.10)

$$N \cong \frac{3,80 - 0,30}{0,0245 + 0,015}$$

$$\text{entonces:} \quad N = 88 \quad (5.11)$$

Con este valor de N, y la expresión (5.6) se recalcula H_P

$$H_P = 88 (0,0254 + 0,015) - 0,015$$

$$H_P = 3,46 \text{ m} \quad (5.12)$$

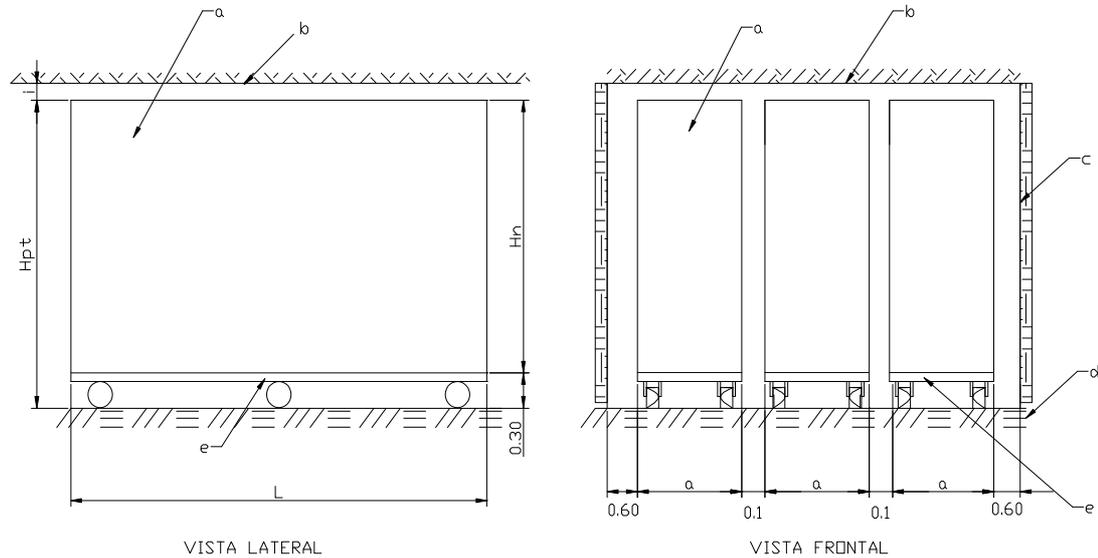


Fig. 5.4 Ubicación de la pila en la cámara de secado

a) Pila de madera. b) Falso techo. c) pared. d) Piso. e) Carrito porta pila.

despejando i en la expresión (5.5) y reemplazando valores se tiene:

$$i = H_L - H_p - h_c \quad (5.13)$$

$$i = 3,8 - 3,46 - 0,3$$

$$i = 0,04 \quad (5.14)$$

y con la expresión (5.3) se tiene: $i = 0,04 \leq 0,05$

y como también se cumple que: $i = 0,04 > t = 0,015$

El número de 88 filas de listones en la pila es correcto, y entonces la altura neta ocupada por la madera será:

$$H_N = N \cdot e \quad (5.15)$$

H_N = Altura neta de la pila de madera.

Reemplazando valores se tiene:

$$H_N = 88 \times 0,0245$$

$$H_N = 2,156 \text{ m} \quad (5.16)$$

Como usarán listones de 1" ; 1 ½" ; y 2" , se tiene:

Tabla 5.2 Altura de las pilas de madera en función del espesor del listón

e_n m	T m	N	H_P m	H_T m	l m	H_N m
0,0254	0,015	88	3,46	3,76	0,040	2,156
0,0380	0,020	60	3,46	3,76	0,040	2,280
0,0510	0,025	46	3,47	3,76	0,030	2,346

En la figura 5.5 se muestra la distribución de los listones. En la dirección transversal de la pila se observa un espacio libre triangular en el tercio central, cuyo propósito es mejorar las condiciones del flujo de aire. Descontando este espacio, el ancho neto ocupado por los listones es:

$$a_N = \frac{1}{3} a + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{3} \right) a + \frac{1}{3} a \quad (5.17)$$

$$a = \text{ancho de la pila} \quad (5.18)$$

$$a_N = 0,8333 a \quad (5.19)$$

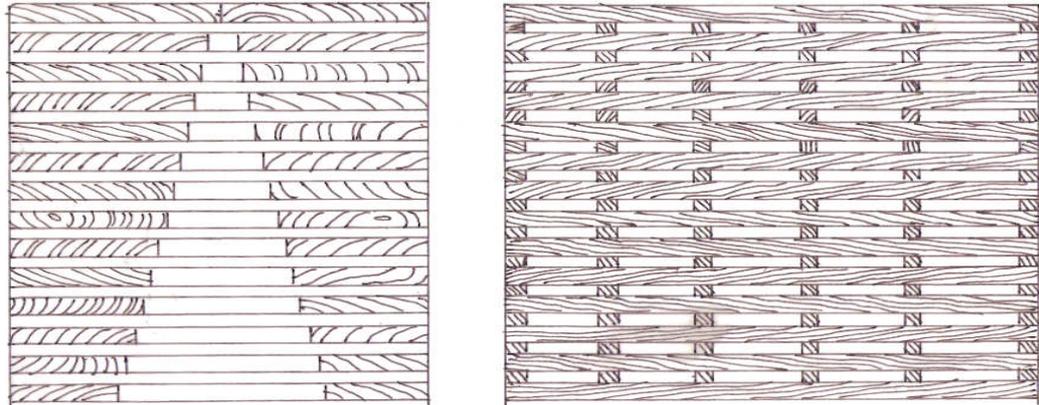


Fig. 5.5 Distribución de los listones en la pila de madera

$$a = 1,25$$

$$a_N = 1,04 \text{ m} \quad (5.20)$$

En este caso la cámara tiene fija la longitud, por lo que se determina una relación entre el ancho de la cámara, el ancho de la pila y el número de filas de pilas que se colocarán dentro de ella. En la figura 5.6 se muestra un arreglo de filas pilas a lo ancho de una cámara de secado:

$$A_c = (a+s) F - s + 2 e_c \quad (5.21)$$

A_c = ancho de la cámara, m

S = es la separación entre filas, m

F = es el número de filas,

e_c = es el espacio libre entre las filas y la pared, m.

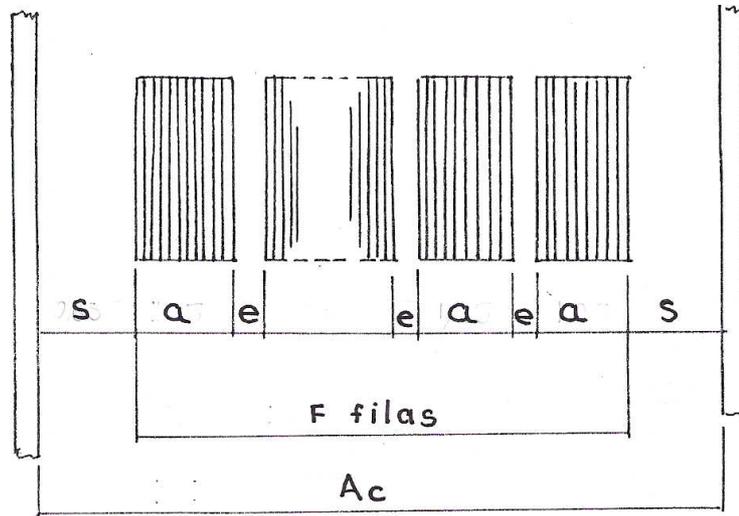


Fig. 5.6 Pilas en la sección transversal de la cámara de secado

de donde:

$$a = \frac{Ac - 2e_c + S}{F} - S \quad (5.22)$$

En la figura 5.3, se observa que las dos columnas centrales dividen la cámara en dos zonas, de 4,21 y 5,25 m de ancho y adicionalmente se considera que:

$$e_c = 0,6 \text{ m} \quad (5.23)$$

$$S = 0,1 \text{ m} \quad (5.24)$$

reemplazando los valores anteriores en 5.23 se obtienen los resultados siguientes:

Tabla 5.3 Ancho de pila, en m, según el número de filas en cámara de secado.

N° DE FILAS	ANCHO DE LA CÁMARA (m)	
	3,85	5,30
2	1,27	2,00
3	0,81	1,30
4	0,58	0,95

El uso de montacargas requiere de parihuelas de 0,10 m de altura, y como se deben utilizar dos como mínimo, ellas ocupan 0,20 m de la altura en el espacio interior de la cámara. Si la carga es manual directamente sobre los carritos no se necesitan parihuelas. Por esto se elige carga manual y para facilitar su manipuleo se selecciona un ancho de 1,25 m, ligeramente menor al correspondiente a tres filas con un ancho de cámara de 5,30 m, lo que da mayor espacio para los pasadizos laterales de servicio del horno. Por lo que se selecciona el lado de 5,30 m para la cámara de secado, con tres filas.

El largo de las pilas se determina con las longitudes de los listones de: 2,5; 2,7; 2,9 y 4,1 m. Como son 3 espesores y 4 longitudes, combinándolos resultan 12 pilas diferentes cuyos volúmenes se obtienen con la expresión 5.1. Tomando como datos:

$$e = 0,0254 \text{ m}$$

$$H_N = 2,156 \text{ m}$$

$$a_N = 1,041 \text{ m}$$

$$L = 2,50 \text{ m}$$

resulta:

$$V_{MH} = 2,156 \times 9,041 \times 2,5 \quad (5.25)$$

$$V_{MH} = 5,6110 \text{ m}^3 \quad (5.26)$$

El volumen en pies tablares se calcula con el factor de conversión:

$$F = 423,58 \text{ pies tablares/m}^3 \quad (5.25)$$

$$V_M = 2376,7 \text{ pt} \quad (5.27)$$

Con este procedimiento, los volúmenes para los 12 tamaños posibles de pilas se dan en la tabla 5.4.

Para determinar cuantas pilas se deben colocar en cada fila se establece un arreglo formado por varias pilas cuya suma de longitudes no sobrepasen la longitud de 9,96 m y cubran al menos el 90% de esa distancia. Como se tienen 4 longitudes de pilas, las identificaremos con una letra código. Tabla 5.5, pero como la suma de las cuatro longitudes supera los 9,96 m se toman de tres en tres por fila

Tabla 5.4 Volumen de Madera por Pila (Pt) para las 12 combinaciones posibles de longitud y espesor del listón

Longitud del listón L (m)	Espesor del listón		
	1"	1 ½"	2"
	0,0254 m	0,038 m	0,051 m
2,5	2 378,1	2 514,8	2 587,6
2,7	2 568,3	2 716,0	2, 794,6
2,9	2 758,5	2 917,2	3 000,1
4,1	3 900,0	4 124,3	4 243,7

Tabla 5.5 Letra código de pila según su longitud

CODIGO	LONGITUD DE PILA (m)
A	2,50
B	2,70
C	2,90
D	4,10

Los arreglos se obtienen por la permutación circular de ellas, los que se muestran en la tabla 5.6 donde en cada casillero se muestran las letras código del arreglo y la suma de de las longitudes de las pilas, que es longitud del arreglo.

Tabla 5.6 Longitud de un arreglo formado por tres pilas de madera

ABC	AAA	BBA	CCA
8,10	7,50	7,90	8,30
ABD	AAB	BBB	CCB
9,30	7,70	8,10	8,50
ACD	AAC	BBC	CCC
9,50	7,90	8,30	8,70
BCD	AAD	BBD	CCD
9,70	9,10	9,50	9,90

De estos arreglos los que cumplen el requisito de longitud son:

Tabla 5.7 Arreglos seleccionados

ARREGLO	AAD	ABD	ACD	BBD	BCD	CCD
Long. Total (m)	9,10	9,30	9,50	9,50	9,70	9,90

Los volúmenes mínimos y máximos de madera húmeda que se pueden colocar en el horno se obtienen con los arreglos AAD y CCD; y los espesores de listón de 1" y 2" de la tabla N° 5.8

Volumen mínimo: AAD y listón de 1" (2,54 cm)

$$V_{\min} = (2\ 378,1 \times 2 + 3\ 900) \times 3 \quad (5.28)$$

$$V_{\min} = 25\ 968 \text{ pt} = 61,30 \text{ m}^3 \quad (5.29)$$

Tabla 5.8 Peso y volumen de los arreglos seleccionados

ARREGLO		AAD 1"	CCD 1 ½"	CCD 2"
Capacidad	Pt	26881	29909	30574
	M ³	63,46	70,61	72,18

Volumen máximo: CCD y listones de 2" (5,08 cm.)

$$V_{\max} = (3\ 000 \times 2 + 4\ 243,7) \times 3$$

$$V_{\max} = 30\ 574 \text{ pt} = 72,18 \text{ m}^3 \quad (5.30)$$

Por tanto, la capacidad del horno es de 30574 pt; fijándose una capacidad nominal de 30000 pies tablares.

5.4.2 Dimensiones de la cámara

La cámara de secado es de 5,25 x 9,96 x 3,8 m con un volumen de 178 m³ y una capacidad de secado nominal de 30 000 pt.

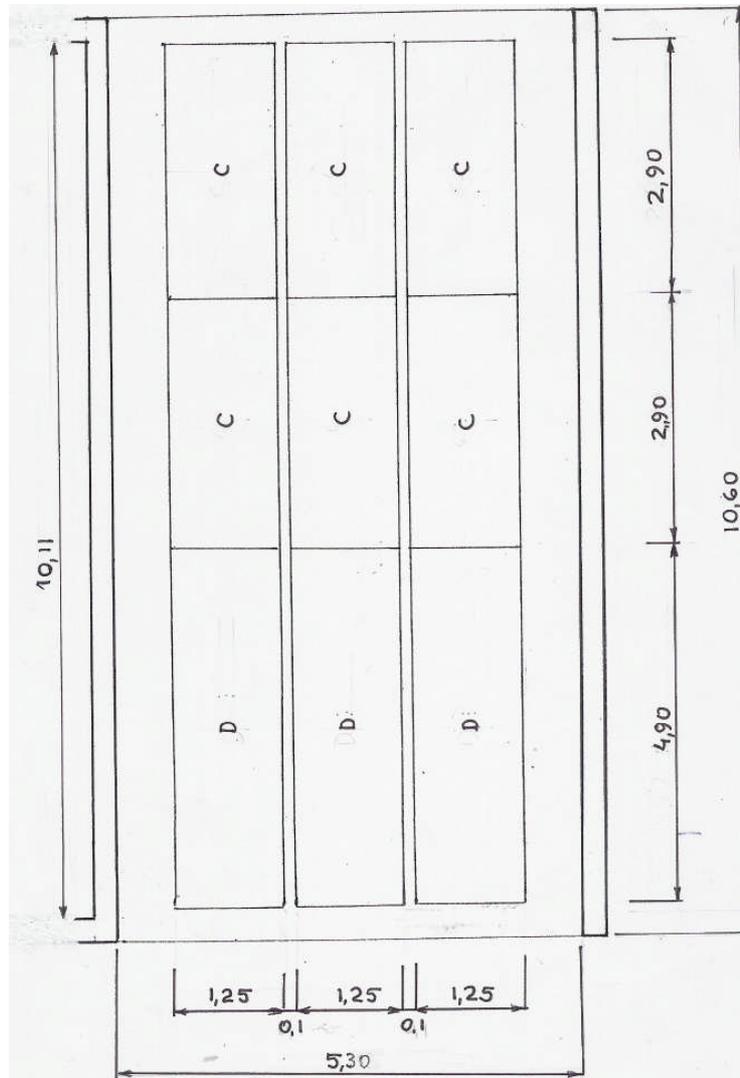


Fig. 5.7 Arreglo de las pilas de madera en la cámara de secado

5.5 Esquema del horno

El horno seleccionado es uno tipo bach, con ventiladores ubicados sobre las pilas y separados de ellas por un falso techo, con renovación parcial de aire, sin recalentamiento y con inversión del sentido del flujo de aire. Para lograr estas condiciones el horno tiene la distribución general que se muestra en la Fig. 5.8.

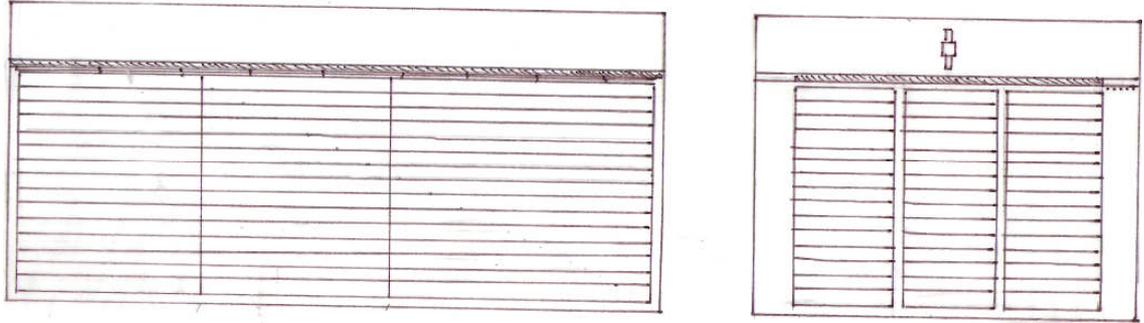


Fig. 5.8 Esquema general del horno.

El horno cuenta con los equipos cuyo esquema de distribución se muestra en la Fig. 5.9 en el cual se señalan los equipos siguientes:

- 1.- Ventiladas de ingreso de aire de reposición (a).
- 2.- Ventilador de recirculación.
- 3.- Ventiladas de ingreso de aire de reposición (b).
- 4.- Resistencias de calentamiento.
- 5.- Ventiladas de salida de aire de renovación (b).
- 6.- Cámara de secado.
- 7.- Ventiladas de salida de aire de renovación (a).
- 8.- Aislamiento térmico.
- 9.- Falso techo.

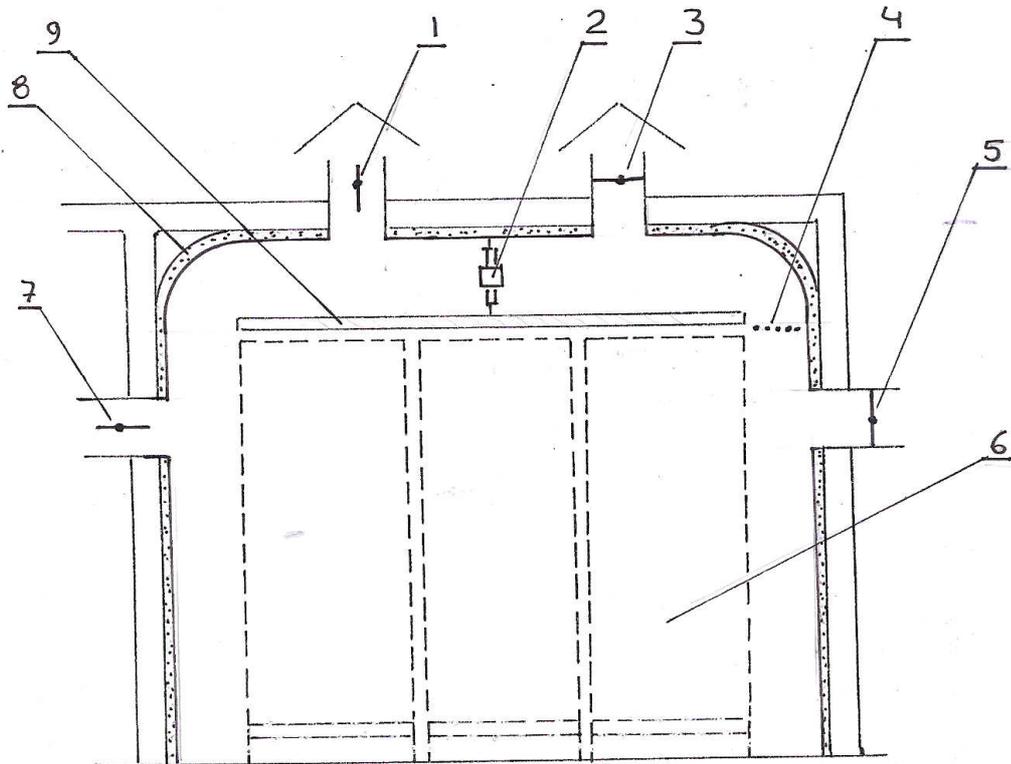


Fig. 5.9 Esquema del horno. Detalles

La madera se seca desde la humedad del 25 al 15 %, por lo que la primera parte el secado se realiza con velocidad constante y después lo hace con velocidad variable, siendo crítica la primera de ellas.

Las ecuaciones que gobiernan el secado se presentaron en 2.6 donde se muestra un diagrama típico de la velocidad de secado de la madera. Fig. 2.14.

En el interior del horno las temperaturas del aire son diferentes y de ellas la de ingreso a la cámara de secado la fija el programa, por lo que debe permanecer constante en cada periodo de secado. En la Fig. 5.10 se

muestra ésta temperatura en el diagrama de secado y su ubicación en el interior del horno. Se puede afirmar:

- Al inicio del programa de secado, se producen las mayores velocidades de evaporación del agua, caídas de temperatura, demanda de aire de secado y renovación de aire.
- En las etapas finales del secado ocurre lo contrario. La caída de temperatura del aire se hace cada vez más pequeña, hasta reducirse a cero y su incremento de HR disminuye lo que reduce la renovación de aire.

5.6 Parámetros de diseño

Los parámetros de diseño dependen de:

- El lugar donde se ubica el horno, que determina el clima exterior del horno. Para el caso de Pucallpa se muestran en la tabla 3.4
- El programa de secado con que opera el horno, que es el Programa Moderado de la JUNAC, mostrado en la tabla 5.11.
- El contenido de humedad de la madera. En este caso para la especie quinilla colorada se tiene 25 % de humedad inicial y 15 % para la humedad final.

-

5.6.1 Climáticos

5.6.1.1 Temperatura del aire ambiente

Esta es la temperatura de Bulbo seco (TBS) del aire exterior. Según SENAMHI, la temperatura promedio anual es de 21,5°C.

5.6.1.2 Humedad relativa.

Según SENAMHI, la humedad relativa promedio anual es de 75%.

5.6.1.3 Velocidad de viento

Para efectos de diseño, en la zona central del Perú se considera una velocidad máxima de 75 Km/h. En este caso el local del horno esta completamente cercado.

5.6.2 De la madera

Se utilizará madera de la quinilla colorada, cuyas características son:

Tabla 5.9 Peso según el contenido de humedad de la madera quinilla colorada

PARAMETRO	Contenido de humedad (%)			
	100	30	15	0
Peso seco (kg)	-	-	-	2006
Peso húmedo (kg)	4012	2608	2307	-
Peso de agua (kg)	2006	602	301	-
Contenido de humedad, X	1	0,3	0,15	-

- El volumen de madera que se va a secar que es de 30000 pt.
- La humedad inicial de la madera es de 25 % y la final de 15 %
- Los pesos de la madera húmeda, seca, cantidad de agua a evaporar para cada arreglo se muestran en la tabla 5.10

Tabla 5.10 Datos de los arreglos pilas de quinilla colorada

Especie	Quinilla colorada			
Peso seco por 1000 pt	Kg/1000 pt	2006	2006	2006
ARREGLO		AAD 1"	CCD 1 ½"	CCD 2"
Capacidad	Pt	26881	29909	30574
	M ³	63,46	70,61	72,18
Peso seco	kg	53924	59997	61331
Humedad inicial	%	25	25	25
Humedad final	%	15	15	15
Peso Inicial	kg	67404	74997	76663
Peso Final	kg	62012	68997	70530
Agua a evaporar	kg	5392	6000	6133

-La temperatura del aire para corregir fallas de secado es de 100 °C y su condición es de aire saturado.

5.6.3 Del interior del horno

Las temperaturas del interior del horno dependen del programa de secado que se utilice para secar la madera. En la figura 5.10, se presenta un corte transversal del horno señalando los puntos exterior 0, el interior 2 inmediatamente antes de ingresar a la cámara de secado, y en la figura 5.11 se muestra un diagrama tiempo-temperatura con las temperaturas del aire exterior; TBS_0 TBH_0 , y del interior TBS_2 y TBH_2 y la temperatura de corrección de fallas.

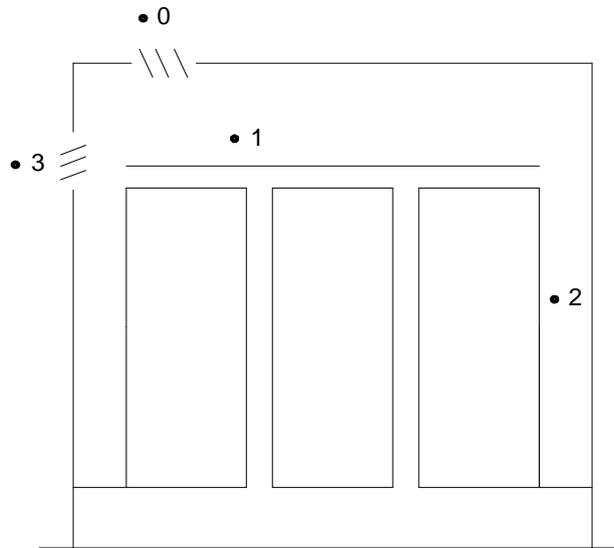


Fig. 5.5 Corte transversal del Horno

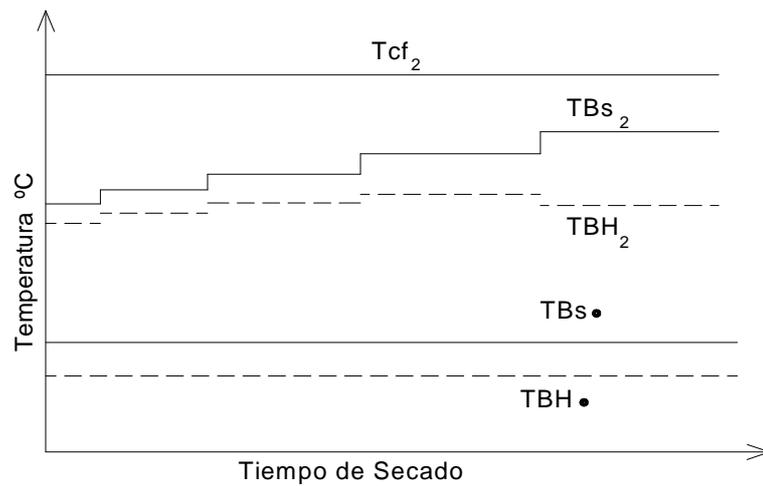


Fig. 5.10 Diagrama de temperaturas en el interior y exterior del horno

5.6.3.1 Programas de secado

Los programas de secado señalados en 4.10 se subdividen en periodos que deben ser analizados individualmente, por lo que para identificarlos se designan con un código de dos letras mayúsculas, la primera identifica el programa de secado, siendo: S, Programa suave. M, Programa

moderado y F, Programa fuerte y la segunda puede ser: A; B; C; D y E, asignadas consecutivamente a cada periodo. Así:

MB Designa al programa moderado, segundo periodo.

SD Designa al programa suave, cuarto periodo.

Fig. 5.11 se grafican los tres programas de secado y cada periodo con su código y en la Fig. 5.12 se representan los climas de los programas moderado y suave en el diagrama psicrométrico.

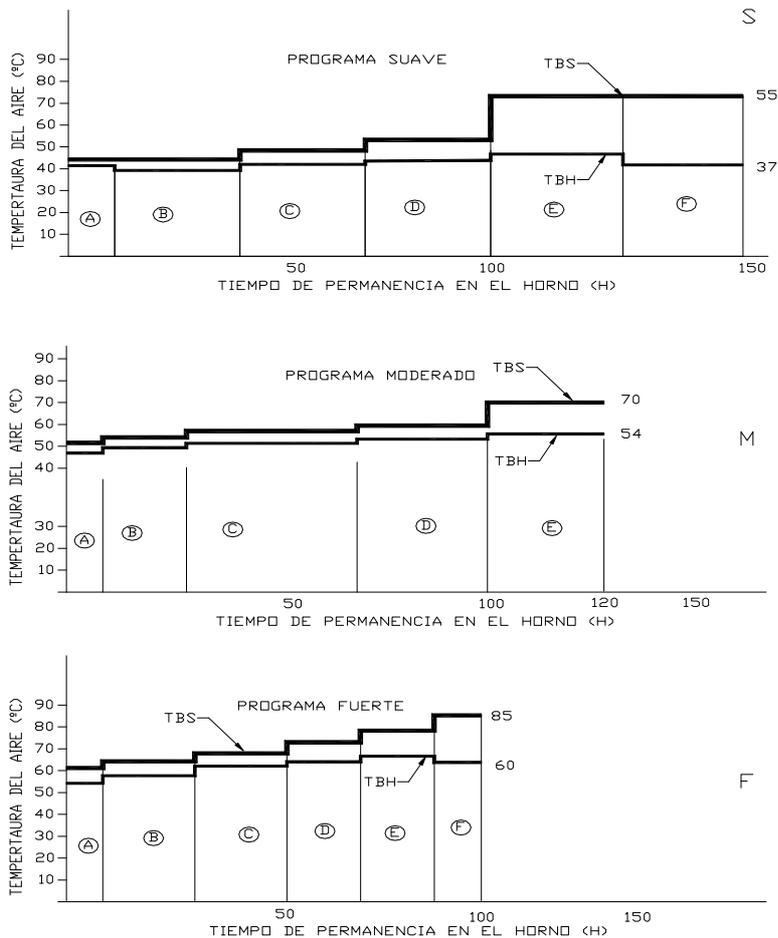


Fig. 5.11 Código de los climas de la cámara de secado según los programas de secado de la JUNAC

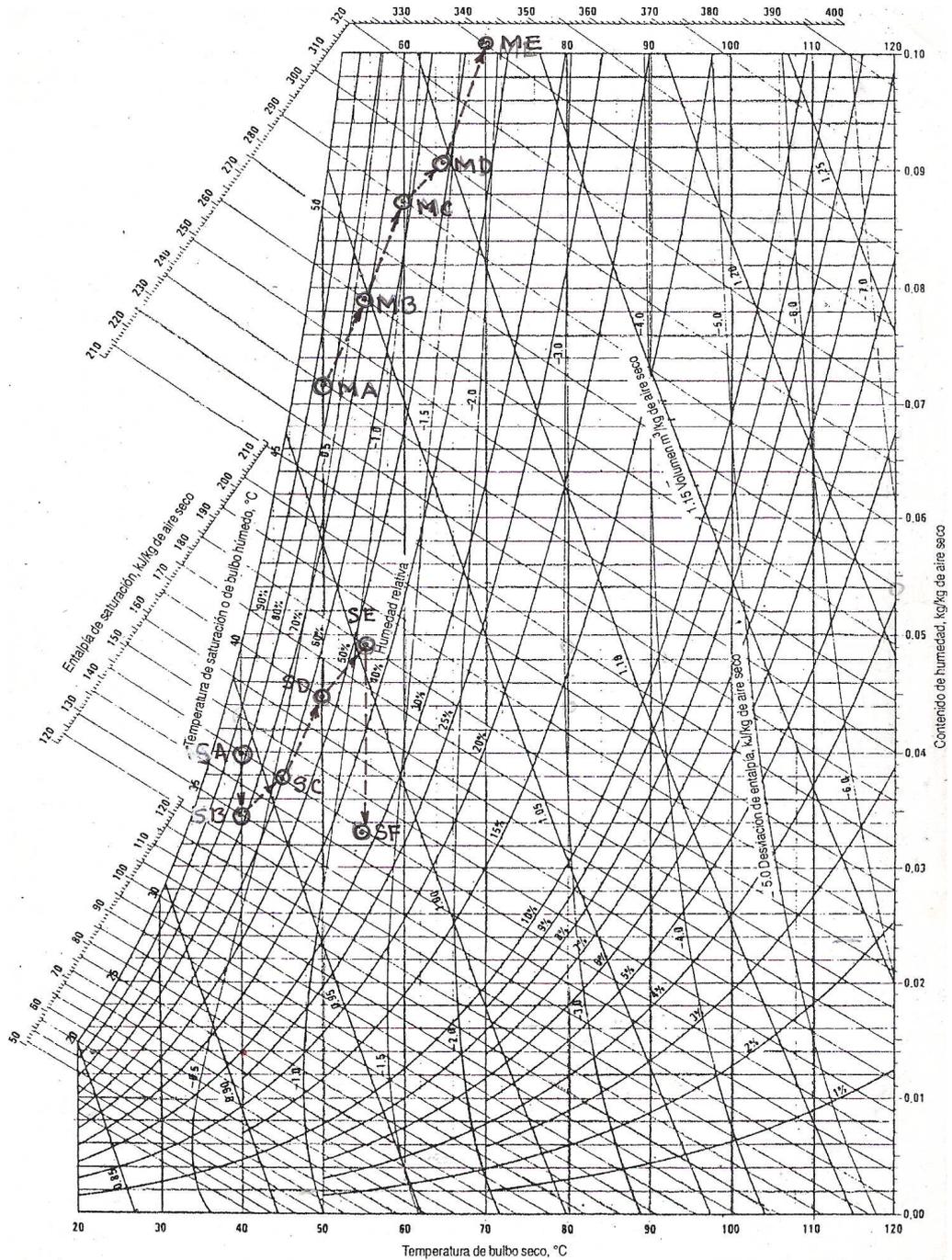


Fig. 5.12 Climas de los Programas de Secado Moderado (M) y Suave (S) de la JUNAC en el diagrama psicrométrico

5.6.3.2 Selección del Programa de secado de diseño

Los programas de secado suaves generalmente se aplican al secado de maderas estructurales, y los moderados para maderas con una amplia gama de aplicaciones. Ambos programas se adecuan a las maderas peruanas, lo que no ocurre con el programa fuerte, por lo que para fines de diseño se toma como representativo el programa de secado moderado cuyos climas se muestran en la tabla 5.11.

Tabla 5.11 Climas del Programa de secado moderado de la JUNAC

Clima	Tiempo τ_h H	Temperatura del aire en la cámara de secado (°C)		HR (%)
		TBS	TBH	
MA	10	50	47	83
MB	20	55	49	70
MC	30	60	51	61
MD	30	65	52	50
ME	30	70	54	44
	120			

5.6.4 Selección de las condiciones de diseño

Cada componente de horno: ventiladores, banco de resistencias, humidificador y ventilas de ingreso y purga de aire tendrá sus condiciones de diseño que corresponden a la máxima exigencia a la que estén sometidos. El análisis de los programas muestra que estas condiciones se producen en diferentes periodos.

Los ventiladores se deben diseñar para el máximo caudal de aire requerido. El análisis realizado en 5.7 muestra que manteniendo la velocidad del aire en su valor óptimo la máxima demanda de aire se producirá cuando se sequen las pilas de madera con el arreglo de menor longitud y menor área de paso transversal, el banco de resistencias debe seleccionarse para cuando se requiera el mayor consumo de calor y las ventilas para evacuar el mayor volumen de aire de renovación.

5.7 Diseño térmico

En este caso se considera el cálculo del flujo de energía térmica entre los componentes del horno. Considerando los límites de la cubierta exterior del horno como un volumen de control, el cambio de energía interna es:

$$E_i = Q_R + Q_V + ma_E (h_E + E_{KE} + E_{PE}) - ma_S (h_S + E_{KS} + E_{PS}) \quad (5.31)$$

E_i = Cambio de energía interna.

Q_R = Calor suministrado por las resistencias.

Q_V = Trabajo realizado por los ventiladores.

ma_E = Masa de aire que ingresa.

h_E = Entalpía de ingreso del aire.

E_{KE} = Energía cinética del aire de ingreso.

E_{PE} = Energía potencial del aire que ingresa.

ma_S = Masa de aire que sale.

h_S = Entalpía de salida del aire.

E_{KS} = Energía cinética del aire que sale.

E_{PS} = Energía potencial del aire que sale.

El calor suministrado por las resistencias eléctricas es:

$$Q_R = Q_{CH} + Q_{AIH} + Q_{MS} + Q_{AGM} + Q_p + Q_{EVAG} + Q_{AS} \quad (5.32)$$

Q_{CH} = Calor para calentar los componentes del horno.

Q_{AIH} = Calor para calentar el aire interior del horno.

Q_{MS} = Calor para calentar la madera seca.

Q_{AGM} = Calor para calentar el agua de la madera que se seca.

Q_p = Calor de pérdidas por la cubierta exterior del horno.

Q_{EVAG} = Calor para evaporar el agua de la madera.

Q_{AS} = Calor para calentar el aire de secado.

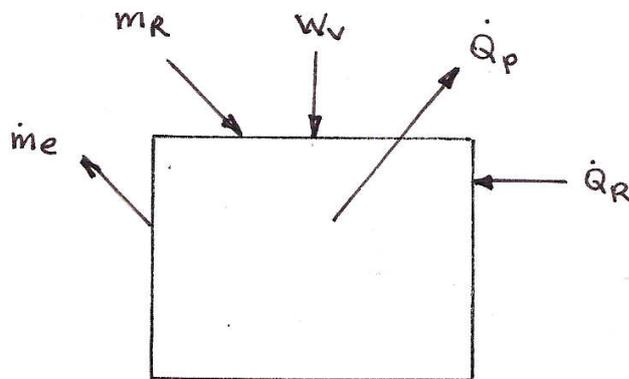


Fig. 5.13 Flujo de energía en el horno

5.7.1 Condiciones de operación

Durante el secado el horno opera en cuatro condiciones:
Calentamiento de los componentes del horno, secado de madera,

corrección de fallas y enfriamiento final. De éstas las que reciben flujos importantes de energía son las dos primeras, la tercera es eventual y en la última no hay calentamiento.

5.7.1.1 Calentamiento del horno.

Debido a que el programa de secado tiene periodos de operación en los cuales el horno trabaja con temperaturas crecientes, para pasar de un periodo a otro es necesario elevar la temperatura de los componentes del horno de la temperatura de un periodo a la del consecutivo, considerándose como componentes a la cubierta exterior: paredes, techo, puertas, al aire contenido en el interior del horno y los equipos y accesorios ubicados en su interior.

El calentamiento se realiza con las ventilas cerradas y con los ventiladores y las resistencias de calentamiento funcionando, es decir, se produce un calentamiento sin renovación de aire, por lo que no hay flujo másico al exterior ni secado. Las expresiones 5.1 y 5.2 simplifican a :

$$E_i = Q_R + Q_V \quad (5.33)$$

$$Q_R = Q_{CH} + Q_{AIH} + Q_{MS} + Q_{AGM} + Q_p \quad (5.34)$$

La velocidad de calentamiento del horno depende del tipo de madera secado. Para las suaves se recomienda 5 °C/h y para medianas 2 °C/h . En este calentamiento se presentan dos casos.

Uno es en el inicio del secado, llamado el arranque del horno, en los que se eleva la temperatura desde la del ambiente hasta la del periodo A. Como el intervalo de incremento de temperaturas es grande su duración puede ser de 15 a 20 horas.

Otro es el calentamiento de un intervalo a otro a partir del intervalo B de programa de secado. En este caso el incremento de temperaturas es de 5 °, por lo que este periodo de calentamiento solo dura 2,5 horas.

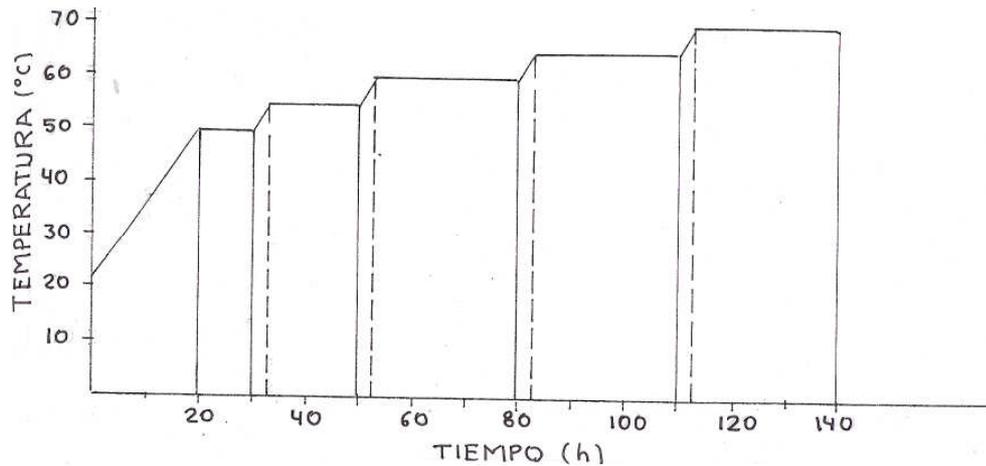


Fig. 5.14 Etapas de calentamiento y secado del horno

5.7.1.2 Secado de madera

Después que el horno alcanzó su temperatura de operación de acuerdo al programa de secado, se abren las ventilas y se inicia la renovación de aire, con lo que también comienza el secado de la madera y las condiciones interiores del horno se mantienen constantes. El cambio de energía es igual al de la expresión 5.2 y como no hay ningún incremento de temperatura el calor suministrado por las resistencias es:

$$Q_R = Q_{AGEV} + Q_{AS} + Q_p \quad (5.35)$$

5.7.1.3 Procesos térmicos considerados

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores los procesos térmicos que se consideran son:

Evaporación de agua, humidificación del aire, transferencia de calor por convección y conducción, y mezcla adiabática de corrientes.

5.7.2 Procedimiento de cálculo gráfico psicrométrico

Considerando el esquema de horno y diagrama psicrometrico de la figura 5.15 el procedimiento se tiene:

a) Punto "0"

Representa al aire del medio ambiente, o clima exterior al horno. Se ubica con los datos de TBS y HR del aire. Ubicado este punto, se determinan gráficamente: W_0 a TBH_0 .

b) Punto 2

Representa las condiciones del ingreso del aire a la cámara de secado. Se ubica con las temperaturas TBS y TBH del Programa de secado. Ubicado este punto, se pueden leer directamente las propiedades del aire: contenido de humedad W_2 ; la humedad relativa HR_2 , la entalpia h_2 y el volumen específico v_2 .

c) Punto 3

Representa las condiciones del aire a la salida de la cámara de secado. Este punto se ubica con la caída de temperatura producida por el secado que se calcula con las ecuaciones del secado 2.7. (7) y con ella se determina T_3 y se ubica el punto 3 en la intersección de esta temperatura y la línea de humidificación adiabática. W_3 es el contenido de humedad del aire a la salida de la cámara de secado. El proceso real no es exactamente

adiabático, por lo que los cálculos de la temperatura y humedad hechos por el lado de la madera no coinciden exactamente con los psicrométricos del aire de secado. Esta diferencia es pequeña y no se considera debido a que los valores reales se deben obtener en los ensayos del horno. Ubicado el punto 3 se pueden leer W_3 ; HR_3 , y $h_3 = h_2$.

d) Punto 1

Representa las condiciones finales de la mezcla de las corrientes de aire de reposición con el de aire de recirculación. Se ubica como la intersección de 2 rectas: la recta 0-3 con la recta de calentamiento del aire con contenido de humedad constante e igual a W_2 .

La relación que existe entre el aire de reposición con el aire de recirculación es la siguiente: la recta 1-3 es proporcional al aire de reposición en las condiciones del punto 0; y la recta 01 es proporcional al aire de recirculación en las condiciones del punto 3.

5.7.3 Calor para secado de la madera

Este calor se calcula con:

$$Q_{AGEV} = \text{mag}_{EV} h_{fg} \quad (5.36)$$

Q_{AGEV} = Calor para secado de madera, kJ/s

mag_{EV} = Masa de agua evaporada , kg/s

h_{fg} = Entalpía de evaporación del agua a TBH, kJ/kg.

El flujo másico de agua evaporada se determina teniendo en cuenta que el calor sensible cedido por el aire sirve para evaporar el agua de la madera por lo que se requiere primero calcular el flujo másico de aire.

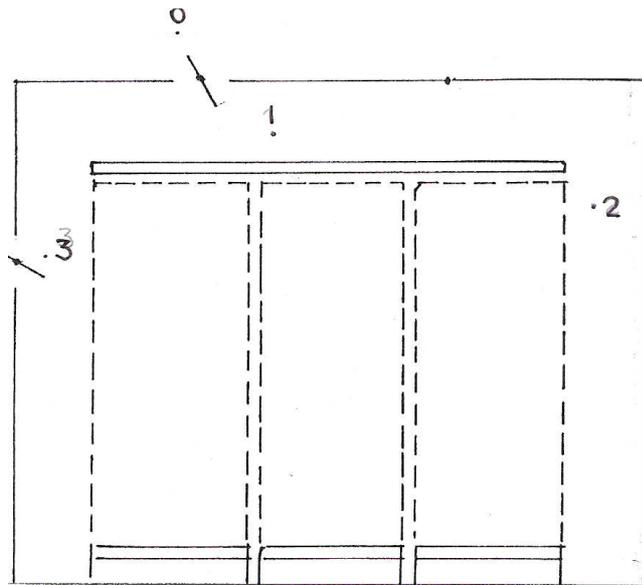
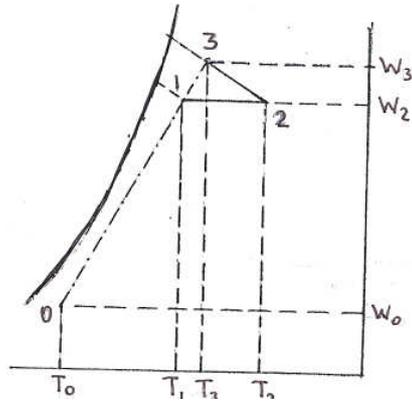


Fig. 5.15 Diagrama esquemático de la carta psicrométrica con el cálculo gráfico y ubicación de puntos en el horno

5.7.3.1 Cálculo del caudal de aire de secado

Como en las pilas se acomodan listones de diferentes longitudes y espesores éstas tendrán diversas áreas transversales:

Para el diseño se consideran los arreglos que tienen la mayor y menor área transversal y así obtener el menor y mayor caudal de aire que debe suministrar el ventilador. Según la tabla 5.7 estos arreglos son AAD y CCD. El área de la pila en la dirección longitudinal, normal al flujo de aire es:

$$A_p = A_L + A_{SE} + A_{CS} \quad (5.37)$$

A_p = área de la pila, m²

A_L = área ocupada por los listones, m²

El área ocupada por los separadores es muy pequeña y el área del carrito de soporte está considerada dentro del área del sardinel, por lo que ambas se consideran cero, entonces:

$$A_p = H_N \cdot L_C \quad (5.38)$$

En la tabla 5.11 se presentan los resultados para los casos de pilas con listones de 1", 1 ½ " y 2" de espesor.

$$Q = V \cdot A_{NP} \quad (5.39)$$

Q = caudal, m³/s

V = velocidad del aire, m/s

A_{NP} = Área neta de paso, m²

$$A_{NP} = A_{TR} - A_p \quad (5.40)$$

El área de la sección transversal la fijan el largo de la cámara y la altura neta de entre el techo y el borde del sardinel guía de los carritos.

$$A_{TR} = L_C \times H_C \quad (5.41)$$

A_{TR} = Área transversal de la cámara, m²

H_C = Altura neta de la cámara, m

$$H_C = h_L - h_{SR} \quad (5.42)$$

h_L = Altura de la cámara, m

h_{SR} = altura del sardinel, m

Las dimensiones y los resultados de aplicar las expresiones anteriores se muestran en la tabla 5.12.

Tabla 5.12 Datos de la pila

Tablón	Espesor		Pulg.	1	1 ½	2
	Separación		mm	25,40	38,10	50,80
ARREGLO				AAD 1"	CCD 1 1/2"	CCD 2"
Longitud	L_C	m		9,10	9,90	9,90
Ancho neto	A	m		3,12	3,12	3,12
Nº de pisos				88	60	46
Altura neta	H_L	m		2,235	2,286	2,337
Área Trans.Pilas	A_P	m ²		20,3	22,6	23,1
Área sección de paso	A_{SP}	m ²		12,01	11,88	11,39
Área de secado	A_S	m ²		4997	3707	2842
Área transversal neta	A_{NP}	m ²		14,73	12,44	11,94
Velocidad del aire	V	m/s		1,5	1,5	1,5
Caudal	Q	m ³ /s		22,10	18,66	17,91

5.7.3.2 Cálculo de la caída de temperatura y velocidad de secado de la madera

Para determinar T_3 se requiere determinar la caída de temperatura en la cámara de secado, la cual dependerá del incremento del contenido de humedad del aire a su paso por las pilas, causada por la evaporación del agua de la madera, lo que a su vez reduce la humedad de la madera.

Como el proceso es adiabático y se realiza en un recinto aislado del exterior, la pérdida de calor sensible del aire es igual al aumento del calor latente de vaporización del agua de la madera, y el incremento de agua del aire es igual a la pérdida de agua de la madera. Las ecuaciones son:

$$q_a = q_{ev.} \quad (5.43)$$

q_a = Calor sensible cedido por el aire, kJ/s

$q_{ev.}$ = Calor latente de evaporación del agua de la madera, kJ/s

$$q_a = m_{a s} \cdot C_p \cdot \Delta T_{2-3} \quad (5.44)$$

$m_{a s}$ = Flujo másico de aire, kg/s.

C_p = Calor específico del aire, kJ/kg.°K

ΔT_{2-3} = Caída de temperatura del aire, °C

$$q_{ev.} = m_{ag EV} h_{fg} \quad (5.45)$$

El peso de agua evaporada es:

$$m_{ag EV} = \frac{X_2 - X_3}{\tau} P_s \quad (5.46)$$

P_s = Peso seco de la madera, kg

τ = Tiempo, s

El cambio de humedad de la madera es

$$\Delta X_{2-3} = \Delta T_{2-3} \frac{C_{P3}}{h_{fg}} \frac{m_{as}}{Ps} \tau \quad (5.47)$$

$$X_3 = X_2 - \Delta X_{2-3} \quad (5.48)$$

El peso de agua evaporada es:

$$A_{EV} = Ps \cdot \Delta X_{2-3} \quad (5.49)$$

Como el peso de agua inicial es:

$$A_i = Ps \cdot X_2 \quad (5.50)$$

El peso de agua residual que queda en la madera es:

$$A_R = A_i - A_{EV} \quad (5.51)$$

Considerando el arreglo CCD 2" como el crítico, se da el programa de secado en la tabla 5.11, el contenido de humedad en la tabla 5.9, los datos de la pila en la tabla 5.12 los datos de entrada de la madera se dan en la tabla 5.13.

El cálculo es iterativo, en el cual para cada periodo se asume una caída de temperatura ΔT_{2-3} en la ecuación 5.47 y calcula ΔX_{2-3} y la X_3 de modo que al final del periodo ME la madera tenga una humedad igual o menor al 15 % requerido. También se calculan el peso de agua evaporada en cada periodo y el agua residual que queda en la madera.

Luego se determina la velocidad de secado de la madera con la expresión:

$$N_s = 10 \cdot Ps \cdot \frac{X_1 - X_2}{As \tau} \quad (5.52)$$

Con los datos de la tabla 5.11 y 5.12 se obtienen los resultados de la tabla 5.13.

El calor para la evaporación del agua se calcula con la expresión 5.45

Tabla 5.13 Datos de entrada para cálculos de secado de madera

Arreglo		CCD 2"				
Peso madera seca		Ps	Kg	61331		
Área de secado		As	m ²	2842		
Humedad inicial		X ₂		0,25		
Peso inicial de la madera húmeda		Po	Kg	76663		
Caudal de aire seco		m _{as}	m ³ /s	17,91		
Temperatura de aire exterior		T ₀	°C	21,6		
Humedad del aire exterior		W ₀	kga./kga.s.	0,01195		
Tiempo de calentamiento del horno:						
Al inicio		τ_a	h	20		
En cada periodo		τ_p	h	2,5		
PROGRAMA		Aire				
MODERADO		Agua				
Periodo	Tiempo	TBS ₂	Ve ₂	W ₂	Cp ₂	hfg ₂₃
	H	°C	m ³ /kg	Kga./kga.s.	kJ/kg.°K	kJ/kg
MA	10	50	1,02	0,0717	1,008	2390
MB	20	55	1,05	0,0792	1,008	2385
MC	30	60	1,08	0,0874	1,008	2380
MD	30	65	1,09	0,0913	1,009	2378
ME	30	70	1,13	1,0100	1,009	2373

Tabla 5.14 Resultados del cálculos del secado de madera

PROGRAMA MODERADO		Aire			Madera			Agua	Secado	
Periodo	tiempo	ΔT	T_3	Ve_2	X_2	ΔX_{2-3}	X_3	Evap.	Q_{AGEV}	Potencia
	H	°C	°C	m ³ /kg				Kg	Kj	kW
MA	10	3	47	1,02	0,25	0,013	0,237	800,9	1914069	53,2
MB	17,5	3	52	1,05	0,237	0,025	0,211	156,9	3729787	59,2
MC	27,5	2.5	57.5	1,08	0,211	0,031	0,180	1903,6	4530613	45,8
MD	27,5	2	63	1,09	0,180	0,024	0,156	1499,8	3566442	36,0
ME	27,5	1	69	1,13	0,156	0,012	0,144	727,8	1727139	17,4

Tabla 5.15 Velocidad de secado de la madera

PROGRAMA MODERADO		SECADO DE MADERA		
Periodo	Tiempo h	Agua	Flujo	Velocidad
		Residual kg	agua ev. kga/s	Secado g/s.m2
MA	10	14532	0,0222	0,00783
MB	17,5	12968	0,0217	0,00764
MC	27,5	11064	0,0176	0,00620
MD	27,5	9565	0,0139	0,00489
ME	27,5	8837	0,0067	0,00237

5.7.3.3 Cálculos psicrométricos

Por el lado del aire se tiene que una vez determinado T_3 se efectúan los cálculos psicrométricos. En la figura 5.11 se muestra un esquema de la carta psicrométrica con los cálculos que se realizan.

Punto MA_0 (Condiciones exteriores)

$$TBS_{A0} = 21,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$HR_{A0} = 75 \%$$

$$w_{A0} = 0,01195 \text{ kg agua / kg aires seco.} \quad (5.53)$$

Punto MA_2 (Ingreso a la cámara de secado)

$$TBS_{A2} = 50 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$TBH_{A2} = 47 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Punto MA_3 (Salida de la cámara de secado)

$$\Delta T_{A23} = 3 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.54)$$

$$T_{A3} = T_{A2} - \Delta T_{A23} \quad (5.55)$$

Reemplazando:

$$T_{A3} = 50 - 3$$

$$T_{A3} = 47 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.56)$$

El punto 3 es la intersección de la vertical de temperatura T_{A3} con la adiabática que pasa por MA_2 de donde resulta que:

$$w_{A3} = 0,0730 \text{ kg agua / kg aires seco.}$$

Punto MA_1 (Mezcla de aire de reposición con aire de recirculación) es la intersección de la recta que une los puntos MA_0 y MA_1 con la horizontal que pasa por MA_2 . En la carta se determinan sus coordenadas:

$$F_{RC} = \frac{TBS_1 - TBS_0}{TBS_3 - TBS_0} \quad (5.57)$$

F_{RC} = Fracción de aire recirculado

El aire renovado es:

$$F_{RN} = 1 - F_{RC} \quad (5.58)$$

F_{RN} = Fracción de aire renovado, kg de aire renovado / kg de aire recirculado

Los resultados se muestran en la tabla 5.16.

5.7.3.4 Temperaturas de los puntos interiores del horno

La temperatura en el punto 4, de las paredes norte y sur se determina como el promedio aritmético de las temperaturas de sus puntos extremos, en este caso los puntos 2 y 3 del horno. Figura 5.12. En la tabla 5.17 se presenta un resumen de las temperaturas del horno.

Tabla 5.16 Resultados de cálculos del las condiciones del aire de secado
Incremento de humedad de aire y calor sensible

PROGRAMA MODERADO							
Aire							
Per.	m_{as} kgas/s	w kga./kga.s	W_3 kga./kga.s	T_1 ° C	F_{RN}	Q_{2-3} kJ	Potencia kW
MA	17,58	0,0013	0,0730	46,0	0,038	1914069	53,2
MB	17,13	0,0013	0,0804	51,0	0,032	3729787	51,8
MC	16,65	0,0011	0,0885	56,7	0,022	4530613	42,0
MD	16,36	0,0008	0,0921	62,3	0,016	3566442	33,0
ME	15,85	0,0004	1,0104	69,0	0,001	1727139	16,0

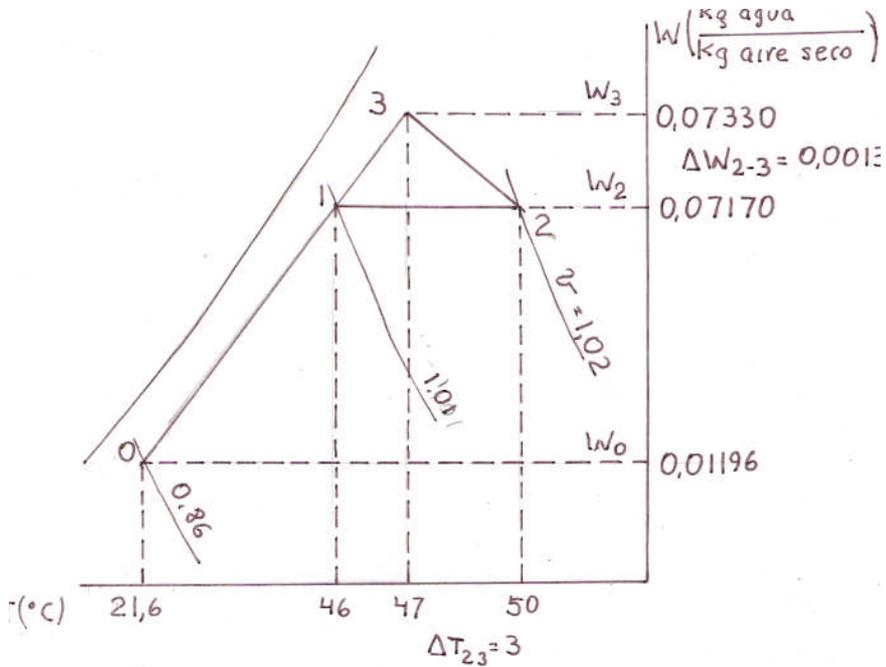


Fig. 5.16 Cálculos psicrométricos

Tabla 5.17 Temperaturas interiores del horno

Programa moderado	TEMPERATURA					RECIRCULACION	
	T0 °C	T1 °C	T2 °C	T3 °C	T4 °C	Frc	Fr
MA	21,6	46,0	50	47	48,5	0,962	0,038
MB	21,6	51,0	55	52	53,5	0,968	0,032
MC	21,6	56,7	60	57,5	58,75	0,978	0,022
MD	21,6	62,3	65	63	64	0,984	0,016
ME	21,6	69,0	70	69	69,5	0,999	0,001

5.7.4 Calor de pérdidas por cubierta exterior

Las pérdidas se producen por la conducción de calor a través de las paredes del horno, convección superficial y radiación superficial. Las temperaturas son bajas y los colores son claros, por lo que no se considerará el efecto de la radiación solar. Se calculan las pérdidas con aislamiento térmico y sin él.

Las pérdidas de calor se determinan con:

$$Q = AU (T_i - T_e) \quad (5.59)$$

$$Q = AUD \quad (5.60)$$

Q = flujo de calor

A = área de la sección recta de paso del calor

D = diferencia de temperatura:

T_i = temperatura interior

T_e = temperatura exterior.

U = coeficiente total de transmisión de calor.

$$U = \frac{1}{R_T} \quad (5.61)$$

R_T = Resistencia térmica total

$$R_T = \sum R_n \quad (5.62)$$

R_n = resistencia térmica del material n.

Se consideran los siguientes casos:

a) Para materiales homogéneos:

$$C_n = \frac{K_n}{L_n} \quad (5.63)$$

C_n = conductancia térmica del material n

K_n = conductividad térmica del material n

L_n = longitud del material n

b) Para materiales no homogéneos:

$$R_n = \frac{L_n}{K_n} \quad (5.64)$$

c) Para el aire:

$$R_i = \frac{1}{h_i} \quad (5.65)$$

h_i = Conductancia superficial de pared, piso y techo, interior.

$$R_e = \frac{1}{h_e} \quad (5.66)$$

h_e = Conductancia superficial del aire sobre pared, piso y techo, exterior.

Aquí cabe señalar que los valores de h_i y h_e dependen de la velocidad del aire sobre la superficie. Para una pared compuesta de n capas de material con conductividad K_n y longitud L_n se tiene:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{L_1}{K_1} + \frac{L_2}{K_2} + \frac{L_3}{K_2} + \dots + \frac{L_n}{K_n} + \frac{1}{h_e} \quad (5.67)$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{L_1}{K_1} + \frac{L_2}{K_2} + \frac{L_3}{K_2} + \dots + \frac{L_n}{K_n} + \frac{1}{h_e}} \quad (5.68)$$

La temperatura de la superficie expuesta al aire se calcula con:

$$T_n = \frac{Q}{AU} + T_e \quad (5.69)$$

Los valores de K, C y h para diversos materiales se dan en la tabla 5.18. Las características del edificio existente son las señaladas en 3.4 y Fig. 3.1; en 5.3 y Fig. 5.2 y la vista isométrica de la cubierta exterior del horno; Fig.5.13

Tabla 5.18 Conductividad y conductancia térmica de diversos materiales

Material	K w/ m.K	C w/ m ² .K	H w/ m ² .K
Ladrillo común	0,70		
Madera	0,20		
Tarrajeo de concreto P''			
Fibra de vidrio	0,027	5,11	
Tierra	0,35		
Aire a m/s			28
Aire a m/s			9

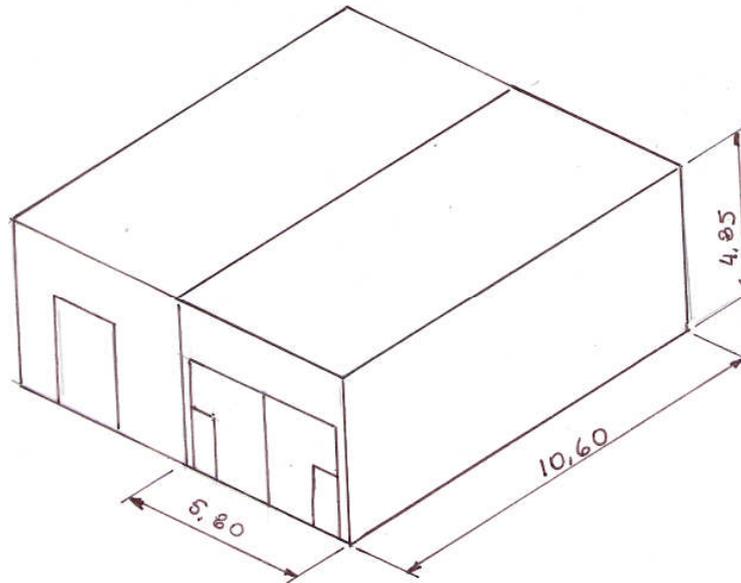


Fig. 5.17 Vista isométrica de la cubierta exterior del horno.

Para efectuar los cálculos de transferencia de calor, la cubierta exterior se subdivide en zonas de materiales de las mismas características, las que son:

Tabla 5.19 Áreas exteriores del horno

	Material	Área m ²
PARED NORTE/SUR		
Zona I	Puerta de madera	19,95
Zona II	concreto	2,10
Zona III concreto	Muro de ladrillo	3,23
PARED ESTE/OESTE	Muro de ladrillo	51,28
TECHO	Aligerado	61,66
PISO	Concreto	53.58

Los parámetros de diseño son: las temperaturas interiores del horno determinado en los cálculos psicrométricos señaladas en la tabla 5.15 y el coeficiente global de transferencia de calor.

Para determinar la conveniencia de utilizar el aislamiento térmico se realiza el cálculo de las pérdidas por la cubierta sin aislamiento térmico y luego con aislamiento térmico.

Como las temperaturas no son muy altas, se considera un aislamiento térmico de materiales fáciles de obtener e instalar, seleccionándose la fibra de vidrio porque es muy común y la propia madera por ser un material con el que se cuenta en abundancia.

El procedimiento de cálculo en ambos casos es el mismo, según lo establecido en 5.10.1.

5.7.4.1 Pérdidas de calor sin aislamiento térmico.

Se considera las paredes del horno formadas por sus elementos actuales; ladrillo común y tarrajeo de concreto por ambas caras; y la puerta de madera como formada por solo 1 tabla de 25 mm de espesor.

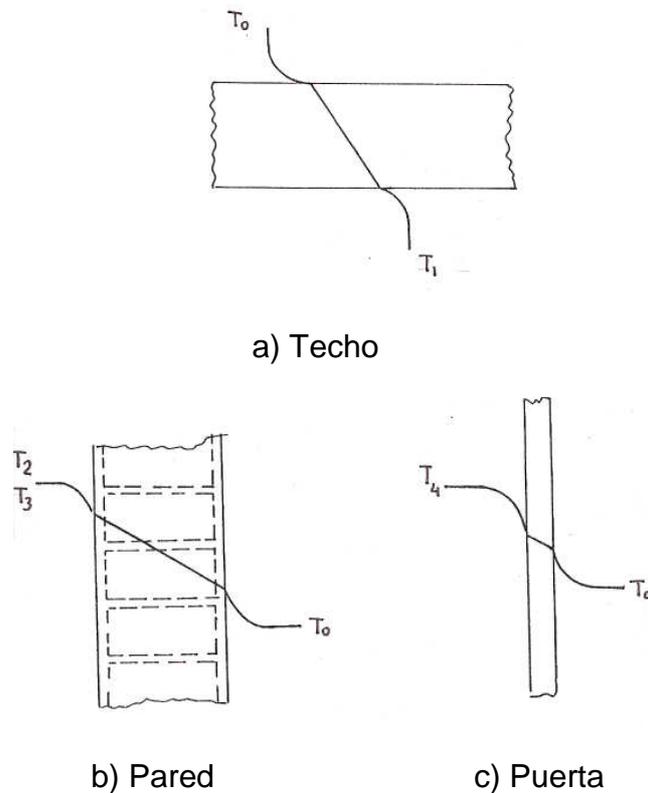


Fig. 5.18 Cubierta exterior del horno sin aislamiento

Con los datos de las tablas 5.18, y 5.19 se realizan los cálculos del coeficiente global de transferencia de calor, según las ecuaciones correspondientes. En la tabla 5.20 se presentan los resultados del cálculo del coeficiente global de transferencia de calor sin aislamiento térmico y las pérdidas de calor del horno para el clima MA se presenta en la tabla 5.21; el MB en la tabla 5.22; el MC en la tabla 5.23; el MD en la tabla 5.24 y el ME en la tabla 5.25

Tabla 5.20 Coeficiente global de transferencia de calor sin aislamiento térmico

	$\frac{H}{W}$ $\frac{m^2 \cdot ^\circ K}{m^2 \cdot ^\circ K}$	L m	$\frac{K}{W}$ $\frac{m \cdot ^\circ K}{m^2 \cdot ^\circ K}$	$\frac{C}{W}$ $\frac{m^2 \cdot ^\circ K}{m^2 \cdot ^\circ K}$	$\frac{R}{W}$ $\frac{m^2 \cdot ^\circ K}{W}$	$\frac{V}{W}$ $\frac{m^2 \cdot ^\circ K}{m^2 \cdot ^\circ K}$
PARED ESTE						2,2763
Aire (exterior)	28				0,0357	
Tarrajeo de cemento		0,015	1,20		0,0125	
Ladrillo común		0,24	0,70		0,3429	
Tartajeo de concreto		0,015	1,20		0,0125	
Aire interior	28				0,0357	
Σ					0,4393	
PARED OESTE						1,9428
Aire exterior	9				0,1117	
Tartajeo de cemento		0,015	1,20		0,0125	
Ladrillo común		0,240	0,70		0,3429	
Tartajeo de cemento		0,015	1,20		0,0125	
Aire interior	28				0,0357	
Σ					0,5147	
PARED FRONTAL/POSTERIOR						
Sección I						2,2763
Igual a la pared Este Σ					0,4393	
Sección II						3,3778
Aire exterior	28				0,0357	
Concreto		0,27	1,20		0,225	
Aire interior	28				0,0357	
Σ					0,2964	
Sección III						5,091
Aire interior	28				0,0357	
Puerta de madera		0,025	0,20		0,1250	
Aire exterior	28				0,0357	
Σ					0,1964	
TECHO						3,5765
Aire interior	28				0,0357	
Concreto (techo 0,20 m)	-	-	-	5,11	0,1957	
Tartajeo de cemento	-	0,015	1,20		0,0125	
Aire exterior	28				0,0357	
Σ					0,2796	
PISO						0,875
Aire interior	28			0,0357		
Concreto		0,30	1,20		0,250	
Tierra		0,30	0,35		0,8571	
Σ					1,1428	

Tabla 5.21

PERDIDAS DE CALOR SIN AISLAMIENTO TERMICO Programa de secado moderado

Periodo MA

PUNTO	PARTE	AREA m ²	T _i °C	T ₀ °C	D T °C	U w/m2 °K	Q/A J/m2	Q _T J/s	h _e w/m2 °K	T _e °C
1	TECHO	61,54	46,0	21,6	24,4	3,5765	87,3573	5375,79	28	24,72
2	PARED ESTE	51,19	50,0	21,6	28,4	2,2763	64,6469	3309,49	28	23,91
3	PARED OESTE	51,19	47,0	21,6	25,4	1,9428	49,3471	2526,24	9	27,08
4	PARED NORTE / SUR									
	I	40,28	48,5	21,6	26,9	2,2763	61,2325	2466,44	28	23,79
	II	2,12	48,5	21,6	26,9	3,3778	90,8628	192,629	28	24,85
	III	4,63	48,5	21,6	26,9	5,091	136,948	633,384	28	26,49
5	PISO	57,77	48,5	20	28,5	0,875	24,9375	1440,59		
PERDIDAS DE CALOR DEL PERIODO MA								15944,6		

Tabla 5.22

PERDIDAS DE CALOR SIN AISLAMIENTO TERMICO Programa de secado moderado

Periodo MB

PUNTO	PARTE	AREA m ²	T _i °C	T ₀ °C	D T °C	U w/m2 °K	Q/A J/m2	Q _T J/s	h _e w/m2 °K	T _e °C
1	TECHO	61,54	51,0	21,6	29,4	3,5765	105,282	6478,85	28	25,36
2	PARED ESTE	51,19	55,0	21,6	33,4	2,2763	76,0284	3892,14	28	24,32
3	PARED OESTE	51,19	52,0	21,6	30,4	1,9428	59,0611	3023,53	9	28,16
4	PARED NORTE / SUR									
	I	40,28	53,5	21,6	31,9	2,2763	7,614	2924,89	28	24,19
	II	2,12	53,5	21,6	31,9	3,3778	107,752	228,434	28	25,45
	III	4,63	53,5	21,6	31,9	5,091	162,403	751,113	28	27,4
5	PISO	57,77	53,5	20	33,5	0,875	29,3125	1693,32		
PERDIDAS DE CALOR DEL PERIODO MB								18992,3		

Tabla 5.23

PERDIDAS DE CALOR SIN AISLAMIENTO TERMICO Programa de secado moderado

Periodo MC

PUNTO	PARTE	AREA m ²	T _i °C	T ₀ °C	D T °C	U w/m2 °K	Q/A J/m2	Q _T J/s	h _e w/m2 °K	T _e °C
1	TECHO	61,54	56,7	21,6	35,1	3,5765	125,55	7726,12	28	26,08
2	PARED ESTE	51,19	60,0	21,6	38,4	2,2763	87,4099	4474,8	28	24,72
3	PARED OESTE	51,19	57,5	21,6	35,9	1,9428	69,7465	3570,55	9	29,35
4	PARED NORTE / SUR									
	I	40,28	58,8	21,6	37,2	2,2763	84,5645	3406,26	28	24,62
	II	2,12	58,8	21,6	37,2	3,3778	125,485	266,029	28	26,08
	III	4,63	58,8	21,6	37,2	5,091	189,131	874,729	28	28,35
5	PISO	57,77	58,8	20	38,8	0,875	33,9063	1958,7		
PERDIDAS DE CALOR DEL PERIODO MC								22277,2		

Tabla 5.24

PERDIDAS DE CALOR SIN AISLAMIENTO TERMICO Programa de secado moderado

Periodo MD

PUNTO	PARTE	AREA m ²	T _i °C	T ₀ °C	D T °C	U w/m2 °K	Q/A J/m2	Q _T J/s	h _e w/m2 °K	T _e °C
1	TECHO	61,54	62,3	21,6	40,7	3,5765	145,683	8965,03	28	26,8
2	PARED ESTE	51,19	65,0	21,6	43,4	2,2763	98,7914	5057,45	28	25,13
3	PARED OESTE	51,19	63,00	21,6	41,4	1,9428	80,4319	4117,57	9	30,54
4	PARED NORTE / SUR	0,00								
	I	40,28	64,0	21,6	42,4	2,2763	96,5151	3887,63	28	25,05
	II	2,12	64,0	21,6	42,4	3,3778	143,219	303,624	28	26,71
	III	4,63	64,0	21,6	42,4	5,091	215,858	998,345	28	29,31
5	PISO	5,77	64,0	20	44,0	0,875	38,5	2224,07		
PERDIDAS DE CALOR DEL PERIODO MD								25553,7		

Tabla 5.25

PERDIDAS DE CALOR SIN AISLAMIENTO TERMICO Programa de secado moderado

Periodo ME

PUNTO	PARTE	AREA m ²	T _i °C	T ₀ °C	D T °C	U w/m2 °K	Q/A J/m2	Q _T J/s	h _e w/m2 °K	T _e °C
1	TECHO	61,54	69,0	21,6	47,4	3,5765	169,421	10425,8	28	27,65
2	PARED ESTE	51,19	70,0	21,6	48,4	2,2763	110,173	5640,11	28	25,53
3	PARED OESTE	51,19	69,0	21,6	47,4	1,9428	92,088	4714,32	9	31,83
4	PARED NORTE / SUR									
	I	40,28	69,5	21,6	4,9	2,2763	109,035	4391,92	28	25,49
	II	2,12	69,5	21,6	47,9	3,3778	161,797	343,009	28	27,38
	III	4,63	69,5	21,6	47,9	5,091	243,859	1127,85	28	30,31
5	PISO	57,77	69,5	20	49,5	0,875	43,312	2502,08		
PERDIDAS DE CALOR DEL PERIODO ME								29145,1		

5.7.4.2 Pérdidas de calor con aislamiento térmico

En este caso se considera un aislamiento térmico interior, en las paredes, puertas y techo, conformado por:

Capa de fibra de vidrio de 50 mm

Cubierta de madera (lisa) de 25 mm

El cálculo del coeficiente global de transferencia de calor U se muestra en la tabla 5.26 y las pérdidas de calor del clima MA se presenta en la tabla 5.27; el MB en la tabla 5.28; el MC en la tabla 5.29; el MD en la tabla 5.30 y el ME en la tabla 5.31.

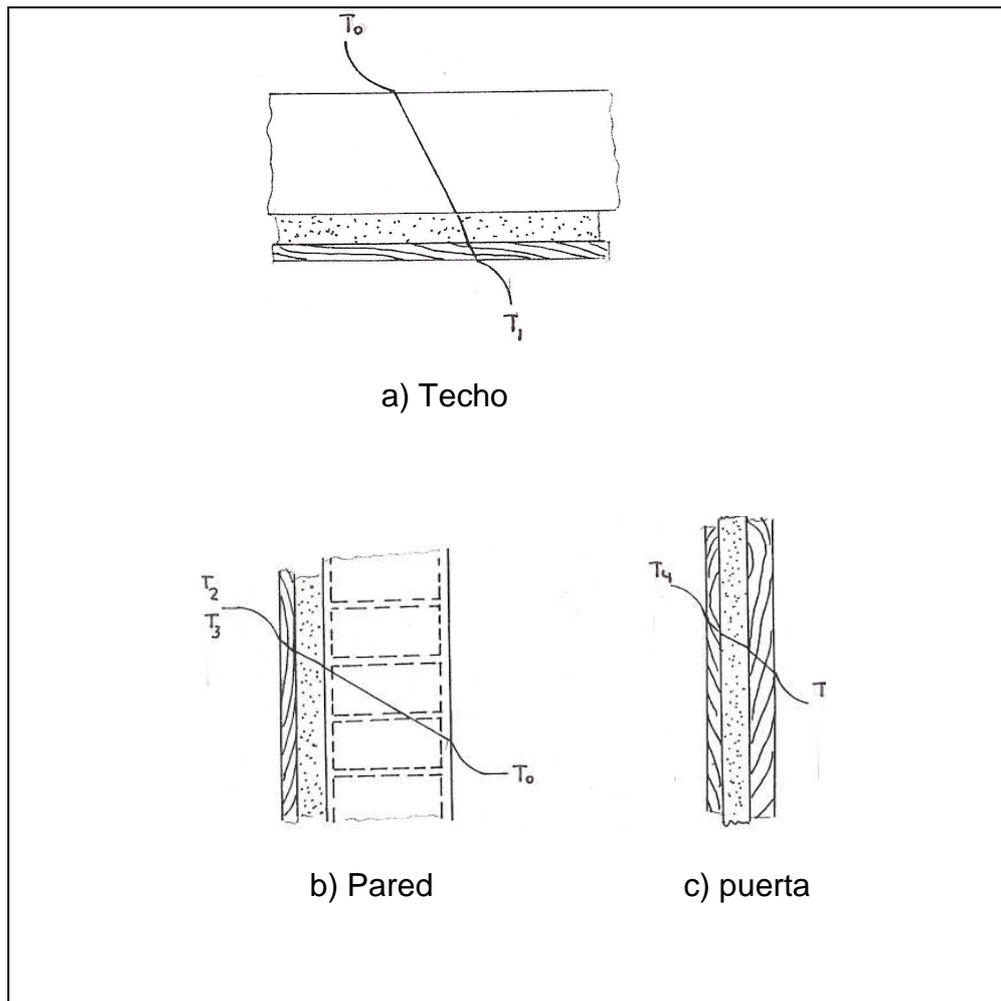


Fig. 5.19 Cubierta exterior del horno con aislamiento

Tabla 5.26 Coeficiente global de transferencia de calor con aislamiento térmico

PARED ESTE						1,3345
Aire exterior	28				0,0357	
Tartajeo de cemento		0,015	1,20		0,0125	
Ladrillo común		0,24	0,70		0,3429	
Tartajeo de cemento		0,015	1,20		0,0125	
Fibra de vidrio		0,05	0,27		0,185	
Madera		0,025	0,20		0,1250	
Aire interior	28				0,0357	
Σ					0,7493	
PARED OESTE						1,2126
Aire exterior	9				0,1111	
Tartajeo de cemento		0,015	1,20		0,0125	
Ladrillo común		0,240	0,70		0,3429	
Tartajeo de cemento		0,015	1,20		0,0125	
Fibra de vidrio		0,05	0,27		0,185	
Madera		0,025	0,20		0,125	
Aire interior	28				0,0357	
Σ					0,8247	
PARED FRONTAL/POSTERIOR						
Sección I						1,3345
Igual a la pared Este						
Sección II						1,6491
Aire exterior	28				0,0357	
Cemento		0,27	1,20		0,225	
Fibra de vidrio	28				0,185	
Madera		0,025	0,20		0,125	
Aire interior	28				0,0357	
Σ					0,6064	
Sección III						1,9747
Aire exterior	28				0,0357	
Puerta de madera		0,025	0,20		0,1250	
Madera		0,025	0,20		0,1250	
Fibra de vidrio		0,05	0,27		0,1850	
Aire interior	28				0,0357	
Σ					0,5064	
TECHO						1,6961
Aire exterior	28				0,0357	
Concreto				5,11	0,1957	
Tartajeo de cemento		0,015	1,20		0,0125	
Fibra de vidrio		0,05	0,27		0,1850	
Madera		0,025	0,20		0,1250	
Aire interior					0,0357	
ΣR					0,5896	
Piso						0,875
Aire interior	28				0,357	
Concreto		0,30	1,20		0,250	
Tierra		0,30	0,35		0,8571	
					1,1428	

Tabla 5.27

PERDIDAS DE CALOR CON AISLAMIENTO TERMICO Programa de secado moderado

Periodo MA

PUNTO	PARTE	AREA m ²	T _i °C	T ₀ °C	D T °C	U w/m2 °K	Q/A J/m2	Q _T J/s	h _e w/m2 °K	T _e °C
1	TECHO	61,54	46,0	21,6	24,4	1,6961	41,427	2549	28	23,08
2	PARED ESTE	51,19	50,0	21,6	28,4	1,3345	37,899	1940	28	22,95
3	PARED OESTE	51,19	47,0	21,6	25,4	1,2126	30,800	1577	9	25,02
4	PARED NORTE / SUR									
	I	40,28	48,5	21,6	26,9	1,3345	35,898	1446	28	22,88
	II	2,12	48,5	21,6	26,9	1,6491	44,360	94	28	23,18
	III	4,63	48,5	21,6	26,9	1,9747	53,119	246	28	23,5
5	PISO	57,77	48,5	20	28,5	0,875	24,937	1441		
PERDIDAS DE CALOR DEL PERIODO MA								9293		

Tabla 5.28

PERDIDAS DE CALOR CON AISLAMIENTO TERMICO Programa de secado moderado

Periodo MB

PUNTO	PARTE	AREA m ²	T _i °C	T ₀ °C	D T °C	U w/m2 °K	Q/A J/m2	Q _T J/s	h _e w/m2 °K	T _e °C
1	TECHO	61,54	51,0	21,6	29,4	1,6961	49,9284	3072	28	23,38
2	PARED ESTE	51,19	55,0	21,6	33,4	1,3345	44,5723	2282	28	23,19
3	PARED OESTE	51,19	52,0	21,6	30,4	1,2126	36,863	1887	9	2,7
4	PARED NORTE / SUR									
	I	40,28	53,5	21,6	31,9	1,3345	42,5706	1715	28	23,12
	II	2,12	53,5	21,6	31,9	1,6491	52,6063	112	28	23,48
	III	4,63	53,5	21,6	31,9	1,9747	62,9929	291	28	23,85
5	PISO	57,77	53,5	20	33,5	0,875	29,3125	1693		
PERDIDAS DE CALOR DEL PERIODO MB								11052		

Tabla 5.29
PERDIDAS DE CALOR CON AISLAMIENTO TERMICO Programa de secado moderado **Periodo MC**

PUNTO	PARTE	AREA M ²	T _i °C	T ₀ °C	D T °C	U w/m2 °K	Q/A J/m2	Q _T J/s	h _e w/m2 °K	T _e °C
1	TECHO	61,54	56,7	21,6	35,1	1,6961	59,5403	3664	28	23,73
2	PARED ESTE	51,19	60,0	21,6	38,4	1,3345	51,2448	2623	28	23,43
3	PARED OESTE	51,19	57,5	21,6	35,9	1,2126	43,5323	2229	9	26,44
4	PARED NORTE / SUR									
	I	40,28	58,8	21,6	37,2	1,3345	49,5767	1997	28	23,37
	II	2,12	58,8	21,6	37,2	1,6491	61,2641	130	28	23,79
	III	4,63	58,8	21,6	37,2	1,9747	73,3601	339	28	24,22
5	PISO	57,77	58,8	20	38,8	0,875	33,9063	1959		
PERDIDAS DE CALOR DEL PERIODO MC								12941		

Tabla 5.30
PERDIDAS DE CALOR CON AISLAMIENTO TERMICO Programa de secado moderado **Periodo MD**

PUNTO	PARTE	AREA m ²	T _i °C	T ₀ °C	D T °C	U w/m2 °K	Q/A J/m2	Q _T J/s	h _e w/m2 °K	T _e °C
1	TECHO	61,54	62,3	21,6	40,7	1,6961	69,0879	4252	28	24,07
2	PARED ESTE	51,19	65,0	21,6	43,4	1,3345	57,9173	2965	28	23,67
3	PARED OESTE	51,19	63,0	21,6	41,4	1,2126	50,2016	2570	9	27,18
4	PARED NORTE / SUR									
	I	40,28	64,0	21,6	42,4	1,3345	56,5828	2279	28	23,62
	II	2,12	64,0	21,6	42,4	1,6491	69,9218	148	28	24,1
	III	4,63	64,0	21,6	42,4	1,9747	83,7273	387	28	24,59
5	PISO	57,77	64,0	20	44,0	0,875	38,5	2224		
PERDIDAS DE CALOR DEL PERIODO MD								14825		

Tabla 5.31

PERDIDAS DE CALOR CON AISLAMIENTO TERMICO Programa de secado moderado

Periodo ME

PUNTO	PARTE	AREA m ²	T _i °C	T ₀ °C	D T °C	U w/m2 °K	Q/A J/m2	Q _T J/s	h _e w/m2 °K	T _e °C
1	TECHO	61,54	69,0	21,6	47,4	1,6961	80,345	4944	28	24,47
2	PARED ESTE	51,19	70,0	21,6	48,4	1,3345	64,589	3307	28	23,91
3	PARED OESTE	51,19	69,0	21,6	47,4	1,2126	57,477	2942	9	27,99
4	PARED NORTE / SUR									
	I	40,28	69,5	21,6	47,9	1,3345	63,9226	2575	28	23,88
	II	2,12	69,5	21,6	47,9	1,6491	78,991	167	28	24,42
	III	4,63	69,5	21,6	47,9	1,9747	94,588	437	28	24,98
5	PISO	57,77	69,5	20	49,5	0,875	43,312	2502		
PERDIDAS DE CALOR DEL PERIODO ME								16875		

Tabla 5.32 a los de pérdidas por cubierta exterior.

Periodo	Tiempo H	T °C	Perdidas	Potencia
			Por cubierta Exterior kJ	kW
Arranque	20	21,6	167268	4,6
MA	10	50	334535	9,3
MB	20	55	795770	11,1
MC	30	60	1397602	12,9
MD	30	65	1601120	14,8
ME	30	70	1822512	16,9

5.7.5 Calor para calentamiento del horno

El calor para el calentamiento del horno se calcula considerando que:

$$Q_{Ci} = m_i C_{Pi} (T_f - T_i) \quad (5.70)$$

Q_{Ci} = Calor del componente i

m_i = Masa del componente i

T_f = Temperatura final del componente i

T_i = Temperatura inicial del componente i

Los componentes considerados son: las paredes, el techo, el piso, las dos puertas, el aire contenido en el interior del horno y los accesorios que se introducen en él como los carritos porta pilas. Con las características y dimensiones del horno de la tabla 5.21 y la ecuación 6.3 se tienen los resultados de la tabla 5.33

Tabla 5.33 Calor para calentar los componentes del horno

Periodo	Temperatura		Tiempo τ h	Componente		Paredes	Techo	Piso	Puertas	Aire	Calor	Potencia	Energía
	Programa			Cp	kJ/kg						TOTAL	Total	Total
	TBSi	TBSf		m	Kg	0,84	0,88	0,88	2,39	1,006			
	° C	° C		d T (° C)		47832	24369	21374	45	63	kJ	kW	kW-h
Arranque	21,6	35,8	20	14.2	570542	72912	63951	364	1813	709583	13	263	
MA	35,8	35,8	2,5	0	0	0	0	0	0	0	0		
MB	35,8	37,1	2,5	1,3	53821	28726	25196	143	319	108205	12	30	
MC	37,1	39,8	2,5	2,7	108263	57783	50682	289	319	217335	24	60	
MD	39,8	42,5	2,5	2,7	108009	57648	50563	288	319	216826	24	60	
ME	42,5	45,5	2,5	2,9	118108	63038	55291	315	319	237070	26	66	

Tabla 5.34 Calor para calentar la madera, el agua de la madera y los carritos porta pilas

Periodo	Temperatura		Tiempo τ H	Componente		Madera	Agua	Carritos	Calor	Potencia	Energía
	Programa			Cp	kJ/kg	2,39	4,185	453	Total	Total	
	TBHi	TBHf		M	kg	61331	15333	400			
	° C	° C		dT (° C)		kJ			kJ	kW	kW-h
Arranque	21,6	47	20	25,4		3723140	1629847	4602480	9955467	138	2765
MA	47	47	2,5	0		0	0	0	0	0	0
MB	47	49	2,5	2		293161	108542	362400	764102	85	212
MC	49	51	2,5	2		293161	92608	362400	748169	83	208
MD	51	52	2,5	1		146580	40028	181200	367808	41	102
ME	52	54	2,5	2		293161	73963	362400	729524	81	203

Tabla 5.35 Calor para secado de madera

Periodo	Tiempo H	T °C	Calor Kj	Potencia kW	Energía kW-h
Arranque		21,6			
MA	10	50	1914069	53,2	532
MB	17,5	55	3729787	59,2	1036
MC	27,5	60	4530613	45,8	1259
MD	27,5	65	3566442	36,0	991
ME	27,5	70	1727139	17,4	480

Tabla 5.36 Calor para calentar el aire de secado

Periodo	Tiempo H	T 3 °C	T 1 °C	ma1 kg/s	Cp1 kJ/kg.°K	Potencia kJ/s	Calor kJ	Energía Kw-h
Arranque	0	21,6						
MA	10	47	46,0	17,58	1,008	17,3	621694	172,7
MB	17,5	52	51,0	17,13	1,008	16,6	1047371	290,9
MC	27,5	57,5	56,7	16,65	1,008	13,4	1322176	367,3
MD	27,5	63	62,3	16,36	1,008	11,0	1089048	302,5
ME	27,5	69	69,0	15,85	1,009	0,5	46506	12,9

5.8 DISEÑO AERODINÁMICO

Su objetivo es calcular el caudal de aire que circulará por el interior del horno y las pérdidas de presión que se producen, para poder seleccionar los ventiladores adecuados.

5.8.1 Componentes del circuito aerodinámico

El circuito del flujo de aire en el horno lo conforman la cámara de secado, el ducto superior, los codos y ductos verticales cuya representación y dimensiones se dan en la Fig. 5.20 y la tabla 5.11

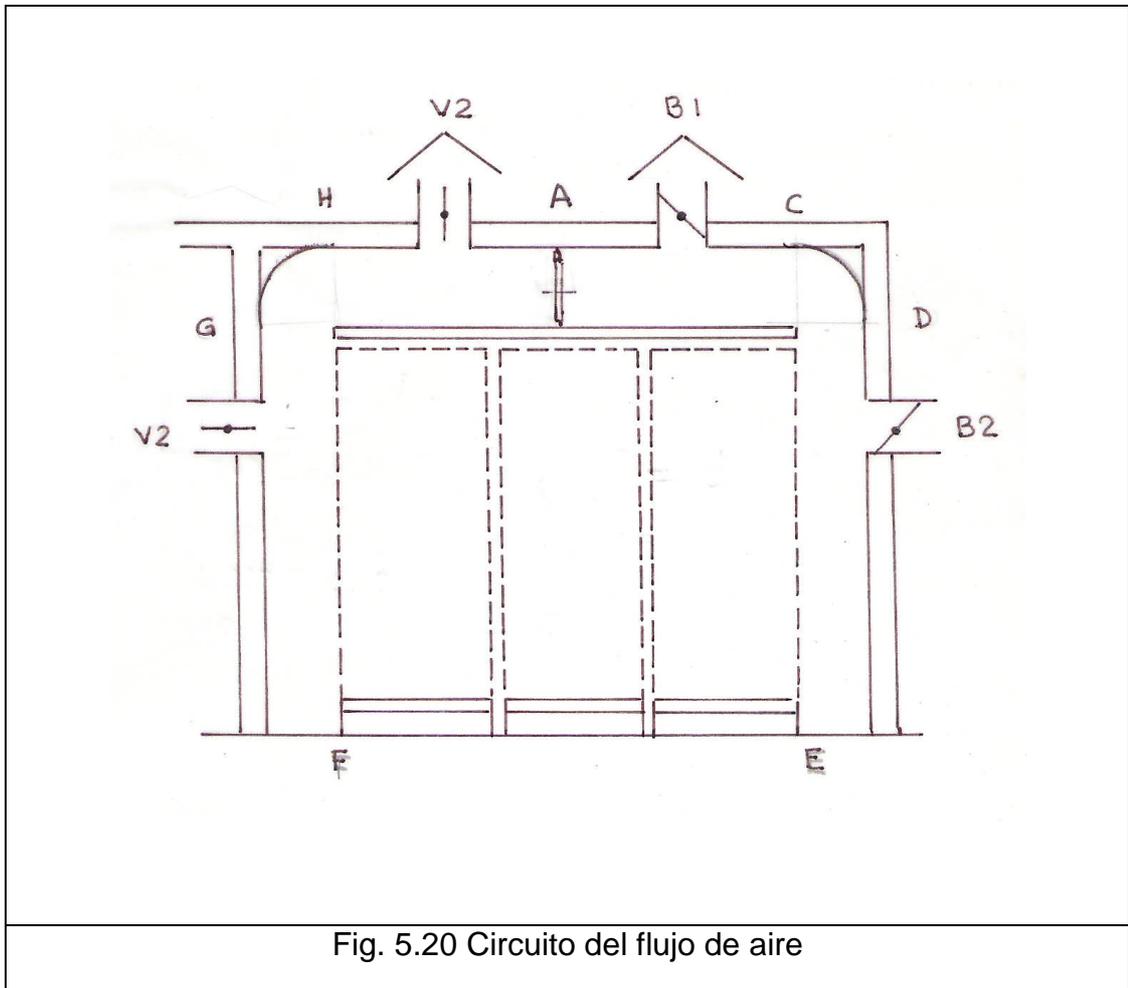


Tabla 5.37 Dimensiones de la sección transversal del horno

CAMARA DE SECADO				
Dimensiones	Longitud	L _c	m	9,95
	Ancho	A _c	m	3,95
	Altura local	h _L	m	3,8
	Altura sardinel	H _{SR}	m	0,275
Material Madera	Rugosidad absoluta	E	m	0,001
	Área transversal	A _{TR}	m ²	35,07
DUCTO SUPERIOR				
Dimensiones	Longitud	L1	m	3,95
	Ancho	A1	m	9,95
	Altura	H1	m	0,6
Material Madera	Rugosidad absoluta	E	m	0,001
DIAMETRO VENTILADOR		D _v	m	0,6
CODO				
Dimensiones	Angulo		°	90
	Ancho	A1	m	9,95
	Altura	H1	m	0,6
Material Madera	Rugosidad absoluta	E	m	0,001
DUCTOS VERTICALES				
Dimensiones	Longitud	L2	m	3,8
	Ancho	A1	m	9,95
	Altura	H1	m	0,6

5.8.2 Caudal total de ventiladores

Los ventiladores están ubicados en el ducto superior de modo que ellos operan con el flujo de aire en las condiciones del punto 1, inmediatamente después de la mezcla.

El aire que circula en los arreglos de pilas seleccionado con los caudales que se muestran en la Tabla 5.11. Los cálculos se realizan con cada uno de ellos.

5.8.3 Caída de presión

El aire circula por los otros componentes del horno a diferentes velocidades y temperaturas, por lo que se producen diferentes caídas de presión. Los ventiladores operan con el aire en la condición del punto 1, inmediatamente después de la mezcla con el aire de reposición, mientras que en la cámara de secado el aire circula a las condiciones del punto 2.

Como en cada periodo de secado estas temperaturas varían, la condición crítica de los ventiladores se presenta cuando opera con el aire de mayor densidad, situaciones que se presentan en el periodo A del programa de secado.

5.8.3.1 Factores de caída de presión.

En la figura 5.14 se observa que el sistema está conformado por un conjunto de ductos de sección rectangular. El ducto HC es horizontal formado por el techo y paredes del horno y el falso techo de la cámara. Está dividido en dos tramos por una pared vertical donde se ubican los ventiladores (punto A). Los codos CD y GH y los ductos verticales DE y FG tienen la misma sección recta.

Las caídas de presión que se calculan con los factores de caída de presión de la tabla 5.38

Tabla 5.38 Ubicación de los ductos y Factores de caída de presión

Factores	Pérdida	Ubicación
K1	Expansión brusca a la salida del ventilador	A
K2	Pérdidas en el ducto del falso techo	HC
K3	Pérdidas en los codos, de ingreso y salida	CD - GH
K4	Pérdidas al paso por las resistencias eléctricas	D
K5	Pérdidas en el ducto vertical de ingreso y retorno	DE y FG
K6	Pérdidas en la pilas de madera	EF

Las pérdidas se determinan en general con la expresión:

$$h_{pi} = (K_i) \frac{V_i^2}{2g} \quad (5.71)$$

h_{pi} = Es la pérdida de presión producida por en el elemento i

K_i = Factor de caída de presión del elemento i

V_i = Velocidad del aire en el elemento i

La caída total es la suma de cada una de ellas con la expresión:

$$h_P = K_1 \frac{V_1^2}{2g} + K_2 \frac{V_2^2}{2g} + 2 K_3 \frac{V_3^2}{2g} + K_4 \frac{V_4^2}{2g} + 2 K_5 \frac{V_5^2}{2g} + K_6 \frac{V_6^2}{2g} \quad (5.72)$$

El cálculo de los factores de caída de presión se realiza considerando la geometría de cada elemento con las expresiones y tablas siguientes:

a) Cálculo de coeficiente de expansión brusca K_1 .

Según Osborne (4):

$$K_1 = \left(1 - \frac{4S_1}{S_2}\right) \quad (5.73)$$

K_1 = coeficiente

S_1 = área del ducto de menor sección, m²

S_2 = área de ducto de mayor sección, m²

La menor sección es la salida del ventilador y la mayor es la del ducto rectangular. Sus áreas son:

$$S_1 = \frac{\pi d_v^2}{4} \quad (5.74)$$

d_v = diámetro del ventilador, m

$$S_2 = A_1 \times H_2 \quad (5.75)$$

A_1 = ancho del ducto

H_2 = altura del ducto

La velocidad en el ducto horizontal es:

$$V_1 = \frac{Q}{S_2} \quad (5.76)$$

V_1 = velocidad, m/s

Q = caudal, m³/s

Con los valores de la tabla 5.37 y las expresiones de 5.70 a 5.73 se obtiene el valor de K_1 en la tabla 5.39

Tabla 5.39 Coeficiente de expansión brusca en el ventilador

COEFICIENTE DE EXPANSIÓN BRUSCA		K1		
Ducto rectangular	Ancho	A1	m	9,95
	Altura	H2	m	0,60
	Área	S2	m	5,97
Diámetro ventilador	Diámetro	Dv	m	0,60
	Área		m ²	0,28
		K1	m	0,81

b) Cálculo del coeficiente de pérdidas del ducto del falso techo K2:

En este ducto se producen dos pérdidas: por fricción en el ducto y por la unión con la corriente del aire de reposición con el de recirculación.

- Factor de pérdidas por fricción, se determina con:

$$K_{2a} = f \cdot \frac{L}{D} \quad (5.77)$$

f = factor de fricción

L = longitud del ducto, m

D = diámetro equivalente, m

$$D = \frac{1}{3} \sqrt[8]{\frac{(AL)^5}{(A+L)^2}} \quad (5.78)$$

A = Ancho del ducto, m

El factor de fricción se obtiene de la ecuación de Darcy:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -0,86 \ln \left(\frac{\varepsilon/D}{3,75} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (5.79)$$

ϵ = Rugosidad absoluta del material del ducto

R_e = Número de Reynolds

$$R_e = \frac{\rho \cdot VD}{\mu} \quad (5.80)$$

ρ = Densidad del aire, kg/m³

V = velocidad del flujo, m/s

μ = Viscosidad cinemática.

En el ducto el aire tiene velocidades que corresponden a los caudales de la cámara de secado calculados para los arreglos AAD 1", CCD 1 ½" y CCD 2", tabla 5.11. Para cada velocidad se calcula el factor de fricción, por aproximaciones, obteniéndose los factores que se muestra en la tabla 5.15

- Factor de pérdidas por unión de corrientes

Para el caso de la unión de corrientes de aire, el cálculo se realiza según lo establecido por ASRAHE entonces.

$$K_{2b} = 0,1 \quad (5.81)$$

c) Coeficiente de pérdidas en los codos. K_3

Según el Manual de la ASHRAE, para codos rectangulares se tiene:

$$K_4 = CK' \quad (5.82)$$

$$\text{Para:} \quad \frac{L}{a} = \frac{9,96}{0,6} = 16,6 \quad (5.83)$$

y para codos de 90°:

$$C = 1 \quad (5.84)$$

Entonces: $K' = 2,3$

$$K_4 = 2,3. \quad (5.85)$$

Tabla 5.40 Coeficiente de pérdidas en el ducto del falso techo K2

DUCTO DEL FALSO TECHO K2					
Fricción en el ducto K2a					
Sección rectangular					
Ancho	A2	m	9,95		
Altura	H1	m	0,60		
Longitud	L1	m	3,95		
Diámetro equivalente	DE3	m	2,20		
Madera	Rugosidad relativa		4,54E-04		
ARREGLO			AAD 1"	CCD 1 ½"	CCD 2"
Numero de Reynolds					
Densidad del aire		kg/m ³	1,20	1,20	1,20
Velocidad del aire		m/s	3,70	3,13	3,00
Viscosidad del aire		0.000018	1,80E-05	1,80E-05	1,80E-05
Factor de fricción					
Asumido	F		0,0176	0,0177	0,0177
Calculado	F		0,0176	0,0177	0,0178
	K2a		0,03	0,03	0,03
Unión de corrientes K2 b					
	K2 b		0,10	0,10	0,10
	K2		0,13	0,13	0,13

Tabla 5.41 Coeficiente de pérdidas en los codos

CODOS		K4		
Sección rectangular	Ancho	A2	m	9,96
	Altura	H1	m	0,60
	A2/h1		m	16,60
Coeficiente por dimensiones		Kc		2,30
Coeficiente por ángulo	Angulo	°		90,00
		C		1,00
K4				2,3

d) Coeficiente de pérdidas por resistencias eléctricas. K_4

El rango del factor de pérdidas es de 2,5 a 9 m. Como en este caso, además de las resistencias se debe tener en cuenta las viguetas de soporte del falso techo, se asume:

$$K = 5 \quad (5.86)$$

e) Coeficiente de pérdidas en los ductos verticales de bajada y subida.

El ducto de bajada se caracteriza porque tres de sus caras la forman las paredes del horno, y la cuarta la forma la sección transversal de las pilas que en este caso tiene 54 niveles, por donde ingresa el aire a ellas. Por esto, al avanzar en este ducto el aire va ingresando continuamente a las pilas lo que reduce el caudal conforme avanza y como la sección es constante disminuye su velocidad, lo que causa una reducción del Número de Reynols y como consecuencia en el diagrama de Moody se observa que el factor de fricción aumenta.

En la expresión 5.86 se ve que el factor de caída de presión es proporcional al cuadrado de la velocidad y al factor de fricción. Este varía poco, pero la velocidad se reduce inversamente proporcional al número de niveles de la pila y en el último nivel es 54 veces menor, por lo que la caída de presión en la parte final del ducto es poco significativa. Como el ducto es relativamente corto, solo tiene 3,8 m, para tener un diseño conservador se supone como caso más desfavorable que la velocidad en el ducto se mantiene constante durante todo el recorrido.

El ducto de subida tiene características iguales al de bajada, solo que en este caso el flujo tiene un sentido inverso, por lo que se considera que las pérdidas son iguales en ambos casos.

Con estas consideraciones se aplica un método de cálculo similar al del ducto superior, en el que aplicando las ecuaciones de 5.74 a 5.86 se determinan el diámetro equivalente, el Número de Reynolds y el factor de fricción. Los datos geométricos y los resultados de los cálculos se presentan en la tabla 5.16.

f) Coeficiente de pérdidas en los ductos de las pilas de madera (K_6).

Este se considera conformado por tres factores:

K_{6a} = Pérdidas a la entrada

K_{6a} = Pérdidas en los ductos

K_{6a} = Pérdidas a la salida del ducto.

Tabla 5.42 Coeficiente de pérdidas en el ducto de subida y bajada

DUCTO DE SUBIDA Y BAJADA		K5			
Fricción en el ducto Sección rectangular					
Ancho	A2	m	9,96		
Altura	H1	m	0,60		
Longitud	L1	m	3,80		
Diámetro equivalente	DE3	m	2,20		
Rugosidad relativa			4.54E-04		
ARREGLO			AAD 1"	CCD 1 1/2"	CCD 2"
Número de Reynolds					
Densidad del aire		kg/m ³	1,06	1,06	1,06
Velocidad del aire		m/s	2,43	2,04	1,96
Viscosidad del aire			1,80E-06	1,80E-06	1,80E-06
			3,14E+06	2,65E+06	2,54E+06
Factor de fricción					
Asumido			0,017	0,017	0,017
Calculado	F		0,0168	0,0168	0,0168
COEFICIENTE		K5	0,03	0,03	0,03

-Pérdidas a la entrada: K_{6a}

Para desviaciones de 90°, el manual ASHRAE señala:

$$K_{6a} = 1 \quad (5.87)$$

-Perdidas a lo largo del ducto: K_{6b}

Estos ductos están formados por el intersticio formado por los listones de madera y los listones separadores con una longitud equivalente al ancho de la pila y se aplica la ecuación de Darcy con un procedimiento de cálculo similar al del ducto superior con las ecuaciones 5.46 a 5.62 y los datos de la tabla 5.17

- Pérdidas a la salida del ducto.

Son equivalentes a las pérdidas de entrada, considerándose el mismo valor. Los resultados de estos cálculos se muestran en la tabla 5.16.

5.8.3.2 Pérdidas totales.

Se calculan aplicando la expresión 5.15 cuyos resultados se presentan en la tabla 5.18

La mayor pérdida total de presión es de

$$H_D = 7,7 \text{ m CA} \quad (5.88)$$

Tabla 5.43 Coeficiente de pérdidas en las pilas de madera.

PERDIDAS EN LAS PILAS		K6			
PERDIDAS EN LA ENTRADA		K6a	1,00	1,00	1,00
PERDIDAS EN LOS DUCTOS		K6b			
ARREGLO			AAD 1"	CCD 1 1/2"	CCD 2"
Ancho (Mínimo del arreglo)	A2	m	0,58	0,53	0M63
Altura	T	m	0,02	0,02	0M02
Longitud	L1	m	3,95	3,95	3M95
Diámetro equivalente	DE3	m	0,076	0,074	0M079
Rugosidad relativa			1,31E-02	1,36E-02	1M27E-02
Numero de Reynolds					
Densidad del aire		kg/m ³	1,058	1,058	1,058
Velocidad del aire		m/s	1,50	1,50	1,50
Viscosidad del aire			1,80E-06	1,80E-06	1,80E-06
			6,70E+04	6,50E+04	6.95E+04
Factor de fricción					
Asumido			0,043	0,043	0,043
Calculado	F		0,043	0,044	0,043
		K6b	2,24	2,33	2,13
PERDIDAS EN LA SALIDA		K6c	1	1	1
COEFICIENTE DE PERDIDAS		K6	4,24	4,33	4,13

Tabla 5.44 Pérdidas totales en el horno

ARREGLO		AAD 1"	CCD 1 1/2"	CCD 2"
		m/s	m/s	m/s
EXPANSIÓN BRUSCA A LA SALIDA DEL VENTILADOR	0,81	3,70	3,13	3,00
DUCTO DEL FALSO TECHO	0,13	3,70	3,13	3,00
RESISTENCIAS ELECTRICAS	5	3,70	3,13	3,00
CODO A	2,30	3,70	3,13	3,00
CODO B	2,30	3,52	2,97	2,85
DUCTO DE SUBIDA Y BAJADA	0,03	2,47	2,08	2,00
PERDIDAS EN LAS PILAS DE MADERA	4,24	1,50	1,50	1,50
PERDIDA TOTAL	M Aire	7,70	5,63	5,22
	mmCA	9,1	6,7	6,2

CAPITULO VI

DISEÑO SELECCIÓN DE EQUIPOS E INSTALACIONES

6.1 Criterios generales

Para determinar si un equipo o instalación se selecciona o diseña, se evalúa si existen los modelos y tamaños adecuados en el mercado. Si existen, como es el caso de de máquinas y equipos de medición y control, se seleccionan teniendo en cuenta dos condiciones:

- Que durante su operación funcionen con la mayor eficiencia.
- Que el porcentaje de carga de operación este en el orden del 80 % de la potencia nominal del equipo.

Los equipos que se seleccionan son los ventiladores, la resistencia eléctrica y su equipo eléctrico asociado, el generador de vapor para los casos de rehumidificación para corrección de fallas de la madera y los instrumentos de medición. Los sistemas de control se deben diseñar, pero en este caso este tema sale del ámbito de la tesis.

El diseño se utiliza en las obras civiles y las instalaciones eléctricas. En este caso particular las obras civiles, como el local ya está construido solo requieren unas modificaciones y su acondicionamiento para quedar como se señala en los planos del horno.

6.2 Selección de los ventiladores

6.2.1 Determinación del caudal y número de ventiladores

Como en la operación del horno se requiere suministrar un caudal tal que la velocidad del aire en la cámara de secado, punto 2 de diagrama psicrométrico, sea constante e igual a la velocidad óptima, que se considera de 1,5 m/s .el que depende del arreglo que se utilice, Tabla 5.16 .Pero los ventiladores trabajan en las condiciones del punto 1 del diagrama, donde la temperatura y el volumen específico son diferentes, pero en ambos casos el flujo másico es el mismo, entonces:

$$Q_i = m_i v_i \quad (6.1)$$

Q_i = Caudal en el punto i del horno, m³/s.

m_i = Masa del aire en el punto i, kg/s

v_i = Volumen específico del aire en el punto i, m³/s.

Considerando los puntos 1 y 2 del diagrama se tiene:

$$\frac{Q_1}{v_1} = \frac{Q_2}{v_2} \quad (6.2)$$

$$Q_1 = \frac{v_1}{v_2} Q_2 \quad (6.3)$$

Los volúmenes específicos, que se muestran en la tabla 5.10 tienen unas relaciones entre ellos del orden de 0,99 por lo que para fines prácticos se considera igual a 1, entonces el caudal de diseño es el de la cámara de secado Q_2 .

Este caudal se incrementa en 10 % para cubrir imprevistos o imprecisiones de cálculo, por lo que el caudal total requerido es:

$$Q_D = 1,1 Q_t \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (6.4)$$

En la tabla 6.1 se presentan los resultados, considerándose como caudal de diseño al mayor de ellos. Para distribuir este flujo de aire en el conducto rectangular sobre el falso techo se necesitan varios ventiladores igualmente espaciados en una distancia de 9.96 m. Si se utilizan n ventiladores para suministrar el caudal total de diseño se tiene un caudal unitario por ventilador de:

$$Q_V = \frac{Q_D}{n} \quad (6.5)$$

Q_D = Caudal de diseño, m³/s

Q_V = Caudal por ventilador, m³/s

La separación entre ejes de los ventiladores es:

$$S_V = \frac{9.96}{n} \quad (6.6)$$

6.2.2 Cálculo de la potencia de los ventiladores

La potencia de los ventiladores se determina de la expresión general siguiente:

$$P_V = \frac{\gamma Q_D H_D}{102 \eta} \quad (6.7)$$

P_V = Potencia, kW

γ = Peso específico

η_V = Eficiencia del ventilador.

Tomando un margen de seguridad de 10 % para cubrir inseguridades de cálculo para la altura se tiene:

$$H_D = 1,1 H_T \quad (6.8)$$

Tomando el valor del caudal para seis ventiladores de la tabla 6.1 y la altura de diseño de la tabla 5.16. se tiene:

$$H_D = 1,1 \quad (7,7)$$

$$H_D = 8,47 \text{ m Aire} \quad (6.9)$$

$$Q_D = 1,1 \quad (3,65)$$

$$Q_D = 4,02 \text{ m}^3/\text{s} \quad (6.10)$$

$$\gamma = 0,88$$

$$\eta_V = 0,65$$

La potencia del ventilador:

$$P_V = \frac{0,88(4,02)(8,4)}{102(0,65)}$$

$$P_V = 0,51 \text{ kW} \quad (6.11)$$

La potencia total de los seis ventiladores es:

$$P_T = 6(0,51) \quad (6.12)$$

$$P_T = 3,06 \text{ kW} \quad (6.13)$$

Con los datos de las tablas anteriores se tienen los resultados que se muestran en la tabla 6.1 Cabe señalar que la última columna de esta tabla no corresponde a las condiciones de diseño si no a las condiciones de operación en el periodo MA por lo que la caída de presión no es la máxima y la potencia corresponde a la de operación en esas condiciones.

Tabla 6.1 Potencia y separación entre ejes de ventiladores

PERIODO		MA			MA
ARREGLO		AAD	CCD 1	CCD	CCD
		1"	½"	2"	2"
Volumen específico V1	m ³ /s	1,01			
Volumen específico V2	m ³ /s	1,02			
Caudal en cámara Q2	Kg/s	22,10	18,66	17,91	17,91
Caudal en ducto Q1	m ³ /s	21,92	18,51	17,76	17,76
Caudal de diseño	m ³ /s	21,92			
SELECCIÓN DE VENTILADORES					
Número de ventiladores		3	4	6	6
Caudal por ventilador	m ³ /s	7,31	5,48	3,65	2,96
Margen de seguridad	%	10	10	10	10
CAUDAL DE DISEÑO	m ³ /s	8,04	6,03	4,02	3,26
PRESION DE DISEÑO	m				
	Aire	8,47			5,22
Eficiencia ventilador	%	65	65	65	65
POTENCIA POR VENTILADOR	kW	1,02	0,76	0,51	0,30
Potencia total de ventiladores	kW	3,05	3,05	3,05	1,52
Ubicación					
Separación entre ejes	m	2,49	1,99	1,42	
Distancia eje borde	m	1,25	1,00	0,71	

Se seleccionan cinco ventiladores, debido a que resulta el menor caudal unitario, y una separación entre ejes de 1,66 metros.

Tomando la mayor potencia para el ventilador se tienen las siguientes especificaciones técnicas:

Marca	:	Airtec
Tipo	:	Axial
Modelo	:	Placa VAF 600
Alabes	:	Fijos
Caudal	:	4,02 m ³ /s
Altura	:	10,0 mm CA.
Temperatura máx.	:	100 °C
Materiales	:	Carcasa: Acero Alabes: Aluminio.
Motor eléctrico		
Tipo	:	Asíncrono
Carcasa	:	N V 90 L
Potencia / velocidad	:	1.8 Hp /1120 rpm
Aislamiento	:	IP-64
Tensión	:	440 V
Frecuencia	:	60 Hz
Acople ventilador/motor	:	Con acople de bridas.

6.3 Cálculo de las resistencias

En cada periodo se presentan dos etapas, la primera es de calentamiento del horno y sus componentes y la segunda es el secado

propiamente dicho y en cada una de ellas se presenta una demanda de calentamiento que es excluyente respecto de la otra.

En la Tabla 6.2 se presentan las potencias requeridas en cada etapa de los cinco periodos del programa. En ella se ve que la máxima potencia se presenta en el periodo de arranque, con 156 kW por lo que las resistencias se diseñán para que puedan suministrar esta potencia.

$$P_{RD} = \frac{P_r}{n_r} \quad (6.9)$$

P_{RD} = Potencia de diseño de las resistencias, w

P_R = Potencia que suministran al aire, W

n_R = Eficiencia de las resistencias.

$$P_{RD} = \frac{156000}{0,8}$$

$$P_{RD} = 195071 \text{ W} \quad (6.10)$$

la potencia eléctrica se expresa como:

$$P = I^2 R \quad (6.11)$$

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (6.12)$$

Con estas expresiones se determinan las corrientes y resistencias para tres niveles de tensión: 220; 380 y 440 V del sistema trifásico, cuyos resultados se muestran en la tabla 6.3

Tabla 6.2 Potencia requerida en las resistencias eléctricas

	RESISTENCIAS							
Etapa	CALENTAMIENTO				SECADO			
Periodo	Madera	Calentar	Perdidas	Total	Secado	Aire de	Perdidas	Total
	Agua	Horno		Potencia		Secado	Cubierta	Potencia
	Kw	kW	kW	kW		kW	kW	kW
Arranque	138,3	13,1	4,6	156,1	0,0	0,0	0,0	0,0
MA	0,0	0,0	0,0	0,0	53,2	17,3	9,3	79,7
MB	84,9	12,0	11,1	108,0	59,2	16,6	11,1	86,9
MC	83,1	24,1	12,9	120,2	45,8	13,4	12,9	72,1
MD	40,9	24,1	14,8	79,8	36,0	11,0	14,8	61,9
ME	81,1	26,3	16,9	124,3	17,4	0,5	16,9	34,8

Tabla 6.3 Corrientes y resistencias para tensiones de 220, 380 y 440 V

POTENCIA	TENSION	CORRIENTE	RESISTENCIA
W	V	A	
195071	220	513	0,248
	380	297	0,740
	440	256	0,992

Se selecciona la tensión de 440 V, y el diámetro de la resistencia viene

expresada por
$$d_c = 0,343 \sqrt[3]{\frac{r P^2}{n s V^2}} \quad (6.13)$$

d_c = diámetro de la resistencia, mm

r = resistividad. Ohm-mm / m²

ns = potencia superficial, W / c m²

Utilizando una resistencia Ni Cr 3020 se tiene:

$$r = 1,04 \text{ Ohm- mm}^2/\text{m} \quad (6.14)$$

$$ns = 4,6 \text{ W/ cm}^2 \quad (6.15)$$

$$V = 440 \text{ V} \quad (6.16)$$

Remplazando en se tiene:

$$d_c = 0,343 \sqrt[3]{\frac{1,04 (64214)^2}{4,6(440)}}$$

$$d_c = 12,5 \text{ mm} \quad (6.17)$$

Seleccionando una resistencia de diámetro estándar de 5 mm la potencia que puede disipar un cm de longitud es:

$$P_u = 10^{-1} \pi d c n s \quad (6.18)$$

$$P_u = 3,1416 (5)(4,6)/10$$

$$P_u = 7,22 \text{ W / cm} \quad (6.19)$$

La longitud necesaria para producir 200806 W es :

$$L_c = \frac{P}{100P_u} \quad (6.20)$$

L_c = longitud de la resistencia, m

Reemplazando se tiene:

$$L_c = \frac{195071}{100(7,2)}$$

$$L_c = 270 \text{ m} \quad (6.21)$$

Como se dispone de una distancia de 9,96 m el número de filas en que se puede distribuir la resistencia eléctrica es:

$$N_f = \frac{270}{9,96}$$

$$N_f = 27,3 \text{ filas.} \quad (6.23)$$

Se seleccionan 28 filas de resistencias de calentamiento y como se dispone de un espacio de 600 mm, la separación entre ejes de las resistencias será:

$$\text{Deje} = \frac{600}{28} \quad (6.24)$$

$$\text{Deje} = 21 \text{ mm} \quad (6.25)$$

La distancia de las resistencias de los extremos a la pared o falso techo es:

$$D_b = \frac{D_{eje}}{2} \quad (6.26)$$

$$D_b = \frac{21}{2}$$

$$D_b = 10,5 \text{ mm} \quad (6.27)$$

Las especificaciones técnicas de la resistencia son:

Tipo	:	Ni Cr 3020
Diámetro	:	5 mm
Tipo	:	Ni Cr 3020
Potencia	:	195071 W
Longitud total	:	270 m
Nº de filas de 9.96.m	:	28
Distancia entre ejes	:	21 mm
Distancia a paredes	:	11,5 mm
Tensión de operación	:	440 V
Frecuencia	:	60Hz
Número de fases	:	3

6.4 Diseño de las ventilas

Las ventilas son ventanas, por donde el aire ingresa o sale del horno, que funcionan por la diferencia de presiones que existe entre el aire del interior y exterior del horno. Esta se produce porque cuando el aire atraviesa el ventilador eleva su presión a la salida del ventilador, pero al ingreso se produce una depresión de igual magnitud, lo que origina una

diferencia de presiones entre el aire del exterior e interior. Si se comunican el exterior de horno con un punto ubicado en el lado de la succión del ventilador, la diferencia de presiones causa el ingreso del aire al horno. Y análogamente, si se comunican un punto de la salida de ventilador se producirá la salida del aire del horno.

La relación entre la velocidad de aire de ingreso y la diferencia de presiones es:

$$V_{VEN} = K_i \sqrt{2g\Delta P} \quad (6.28)$$

V_{VEN} = Velocidad del aire en la ventila, m/s.

K_i = Coeficiente de contracción del agujero.

ΔP = Diferencia de presiones, m de aire.

g = aceleración de la gravedad, m/s².

El caudal del aire en la ventila es:

$$Q_{VEN} = V_{VEN} \cdot A_{VEN} \quad (6.29)$$

Q_{VEN} = Caudal de aire en la ventila, m³/s.

A_{VEN} = Área de la ventila, m².

Además:

$$Q_{VEN} = F_{RN} \cdot Q_1 \quad (6.30)$$

Q_1 = caudal del ventilador, m³/s

Considerando ventilas circulares se tiene:

$$D_{VEN} = \sqrt{\frac{4A_{VEN}}{\pi}} \quad (6.31)$$

D_{VEN} = Diámetro de la ventila, m.

Para agujeros con válvulas compuerta tipo mariposa totalmente abierta se tiene :

$$K_i = 0,17 \quad (6.32)$$

La caída de presión mínima, según la tabla 5.4 es:

$$\Delta P = 5,22 \text{ m}$$

La fracción de renovación es 0,038; pero por seguridad se toma:

$$F_{RN} = 0,05$$

El caudal en el ventilador, es:

$$Q_1 = 4,02 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Reemplazando datos resulta:

$$D = 0,385 \text{ m}.$$

6.4 Diseño de los carritos porta pilas

Los carritos porta pilas están conformados por un marco de acero comercial A 36 apoyados sobre ejes transversales fijos en los que se ubican las ruedas. Como todos los carritos tienen el mismo ancho, el caso más crítico se presenta para el que tiene mayor longitud, que es de 4,10 m. En éste caso para reducir al mínimo la flexión del marco del carrito se utilizan tres ejes, dos ubicados en los extremos y el tercero en el centro, tal como se muestra en la figura 6.1.

El método de diseño consiste en determinar las dimensiones de las vigas del bastidor de soporte, seleccionando un perfil estándar adecuado y dimensionando el eje de las ruedas del carrito

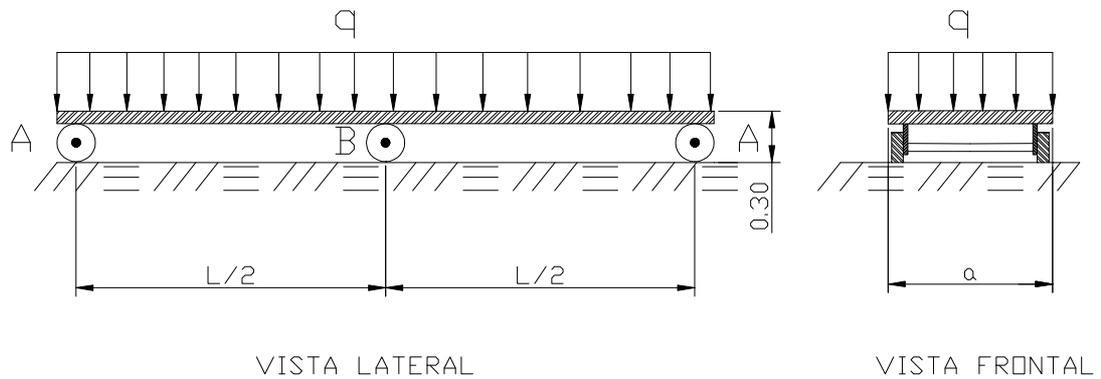


Fig. 6.1 Carrito porta pilas

En el caso de la viga de soporte, se tiene una viga con una carga uniformemente distribuida simplemente apoyada, con tres apoyos, lo que la convierte en un caso hiperestático.

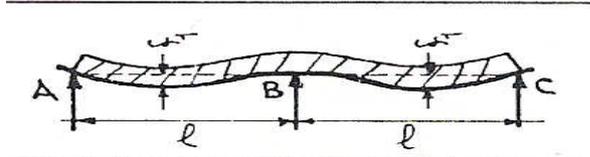
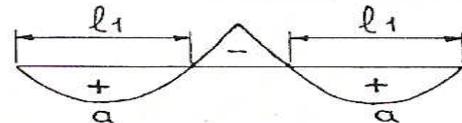
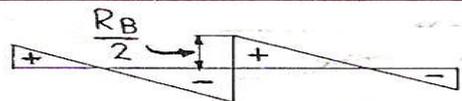
En el caso de los ejes de las ruedas se tiene un eje simplemente apoyado que no gira, con cargas concentradas en sus extremos y dos apoyos, por que es un caso estáticamente determinado. Pero observando el esquema del carrito de la figura 6.1 se ve que se que los ejes A de los extremos soportan una carga diferente al eje central B, por lo que se diseñarán ejes diferentes para cada caso.

Finalmente se seleccionan los rodamientos requeridos en los ejes de los carritos.

La carga distribuida de diseño la determina el mayor peso de la madera húmeda, que se presenta para el caso de utilizarse el arreglo "D" con tabloncillos de madera de 2" de espesor.

El valor de la carga distribuida de diseño se obtiene distribuyendo la carga total entre las tres filas de carritos y luego entre los tres carritos del arreglo. Finalmente, ésta se divide entre las dos vigas principales que tiene cada carrito.

Las reacciones en los apoyos, el máximo momento flector y la máxima flecha se calculan con las Tablas de los principales tipos de vigas y sus cargas, como las de R. Nonnast. (14) representada en la Fig. 6.2

Tipo de carga	
Momentos flectores	 $Mf_A = 0,0703 \cdot q \cdot l^2$ $Mf_B = 0,1250 \cdot q \cdot l^2 \quad l_1 = 0,75 \cdot l$
Esfuerzos cortantes	 $Q_A = R_A \quad Q_C = R_C$ $Q_B \text{ izquierda} = \frac{R_B}{2}$
Reacciones en los apoyos	$A = C = 0,3750 \cdot q \cdot l$ $B = 1,250 \cdot q \cdot l$
Flecha máxima	$f_1 = 2,48 \cdot \frac{\left(\frac{q}{10}\right) \cdot \left(\frac{l}{100}\right)^4}{I}$
<p>Fig. 6.2 Viga simplemente apoyada, con carga distribuida y tres apoyos</p>	

Los datos de entrada para el cálculo son:

Tabla 6.4 Datos de cargas sobre el carrito.

Peso total de la madera		Kg.	76663,3
Peso por fila		Kg.	25554,4
Longitud total del arreglo		m	9,6
Longitud del carrito	L_c	m	4,1
Peso total sobre el carrito	W_c	Kg.	3638,0
Peso sobre una viga		Kg.	1819,0
Carga distribuida	Q	kg/cm	2,2
Esfuerzo permisible de flexión Acero A-36	T_w	kg/cm ²	1518,6

Remplazando estos datos en las expresiones que se muestran en la

Fig. 6.4 se obtienen los resultados siguientes:

Tabla 6.5 Resultados de momento resistente requerido.

Momentos	M_{fa}	kg-cm	7164,8
Flectores	M_{fb}	Kg-cm	12614,2
Reacciones	A	kg	184,6
en los	B	kg	615,3
Apoyos	C	kg	184,6
Esfuerzos	Q_A	kg	184,6
Cortantes	Q_B	kg	307,7
	Q_C	kg	184,6
Momento resistente necesario	MR	kg-cm	8,3
Flecha máxima admisible	F_m	cm	0,41
Tensión cortante máxima		kg	590

Con estos resultados se selecciona el perfil más adecuado

El momento resistente se determina con:

$$R_x = M_f / T_w \quad (6.33)$$

R_x = momento resistente del perfil, cm^3

Tabla 6.6 Selección de perfil estándar.

Perfil	I PN 8	
Momento resistente	cm ³	19,5
Sección	cm ²	7,58
Momento de Inercia	cm ⁴	77,8
Peso	kg/m	5,95
Flecha máxima	Cm	0,1
Tensión cortante	Kg	0,32

El cálculo de los diámetros de los ejes de los carritos de soporte se hace aplicando el método de la ASME, cuya expresión para casos generales es:

$$S_{sd} = \frac{16}{\pi d_o^3 (1 - K^4)} \sqrt{K_m M + \frac{\alpha F d_o (1 - K^2)}{8} + (K_T T)^2} \quad (6.34)$$

$$K = \frac{d_i}{d_o} \quad (6.35)$$

En este caso particular se trata de un eje sólido que no gira y que no está sometido a cargas axiales por lo tanto se tiene que:

$$d_i = 0$$

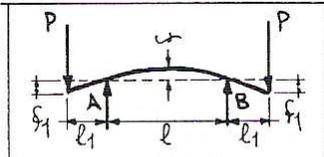
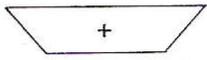
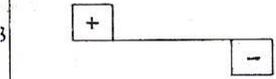
$$T = 0$$

$$F = 0$$

Con lo que la ecuación de la ASME se reduce a:

$$d_o = \sqrt[3]{\frac{16}{\pi S_{sd}} K_m M} \quad (6.36)$$

Los momentos flectores M , considerando al eje como simplemente apoyado con cargas concentradas se determinan de acuerdo con la figura 6.3.

Tipo de carga	
Momentos flectores	 $Mf_{\max} = P \cdot l_1$
Esfuerzos cortantes	 $Q_A = R_A$ $Q_B = R_B$
Reacciones en los apoyos	$A = B = P$
Flecha máxima	$f = \frac{P \cdot l^2 \cdot l_1}{8 \cdot E \cdot I}$ $f_1 = \frac{P}{E \cdot I} \cdot \left(\frac{l_1^3}{3} + \frac{l_1^2 \cdot l}{2} \right)$
<p>Fig. 6.3 Eje que no gira con dos cargas concentradas, simplemente apoyado en dos apoyos.</p>	

Considerando:

$$S_{sd} = 0.3S_y \quad (6.37)$$

$$K_m = 1.5$$

Seleccionando un acero Boheler SAE 3135 DIN 34 Cr Ni Mo con:

$$S_{sd} = 34064 \text{ lb/pul}^2$$

Par los ejes A y B del carrito, figura 6.1, se tiene:

Tabla 6.4 Cálculo de los ejes.

Dimensiones de los ejes	L	Cm	120	
	L1	Cm	1	
Momentos Flectores	Ma	Kg-cm	184,6	
	Mb	Kg-cm	615,3	
Esfuerzos Cortantes	QA	Kg/cm ²	184,6	
	QB	Kg/cm ²	615,3	
Diámetro de los ejes	Km		1,5	
	Ssd	Kg/cm ²	2,393	
	Da	Calculado	Mm	83,8
		Estándar	Mm	87,3
	Db	Calculado	Mm	125,2
		Estándar	Mm	125,4

6.1 Selección de los rodamientos

Los rodamientos están sometidos a las condiciones de trabajo siguientes:

- Servicio corto e intermitente.
- Carga brusca.
- Velocidad de transporte: 1 m/s (manual)
- Carga radial, carga axial por seguridad ante posibles choques.
- Eje estacionario y sólido, con rodamientos montados en voladizo.

Para estas condiciones se selecciona un rodamiento de rodillos cónicos.

- Velocidad e giro, (n) rpm.

$$N = \frac{60.V}{\pi.D} \quad (6.38)$$

N = Velocidad de giro, rpm.

V= velocidad del carrito, m/s

D = Diámetro de eje, m

Calculamos el equivalente de 12000 horas de funcionamiento en millones de revoluciones.

$$L_H = 12000.60.N.10^{-6} \quad (6.39)$$

La carga dinámica equivalente se determina con:

$$F_E = 0.56 C_R F_R + C_T F_Z \quad (6.40)$$

F_E = Carga dinámica equivalente, kg.

F_R = Carga estática radial, kg.

C_R = Constante de proporcionalidad dada por el fabricante.

C_T = Constante de proporcionalidad dada por el fabricante.

Teniendo en cuenta que:

$$C_R = 1,2 \quad (6.41)$$

$$F_z = 0 \quad (6.42)$$

Luego se calcula a capacidad básica para un millón de revoluciones con:

$$F_{BR} = \left(\frac{L_h}{L_{1^6M}} \right)^{\frac{1}{3}} F_e \quad (6.43)$$

Luego se selecciona el rodamiento en las tablas.

Con los datos de la tabla se realizan los cálculos, aplicando la ecuaciones anteriores, cuyos resultados para los rodamientos del eje central B se dan en la tabla 6.5 y para los rodamientos de los extremos A y C que son iguales, se dan en la tabla 6.89

Tabla 6.5 Selección e los rodamientos del eje B.

Velocidad	v	m/s	1,0
Diámetro	d	mm	120,0
Giro del eje	N	rpm	173,7
Tiempo de vida	Lh	h	12000
Millones de vueltas	L	Mrpm	125,1
Carga estática radial	F _R	kg	615,3
Coeficiente de proporcionalidad	Cr		1,2
Carga dinámica equivalente	F _E	kg	413,5
Capacidad básica 10 ⁶ rpm	F _{BR}	kg	2067,9
Rodamiento: Rígido de bolas	NTN		6824 ZZ

Tabla 6.6 Selección de los rodamientos de ejes A y C.

Velocidad	v	m/s	1,0
Diámetro	d	mm	85.0
Giro del eje	N	Rpm	238,9
Tiempo de vida	Lh	H	12000
Millones de vueltas	L	Mrpm	172,0
Carga estática radial	F _R	Kg	184,6
Coefficiente de proporcionalidad	Cr		1,2
Carga dinámica equivalente	F _E	Kg	124,0
Capacidad básica 10 ⁶ rpm	F _{BR}	Kg	689,8
Rodamiento: Rígido de bolas		NTN	6817 ZZ

CAPITULO VII

EVALUACION ENERGETICA

7.1 Criterios generales

Para determinar el consumo de energía de una operación batch se considera el consumo total de energía, que comprende a las de calentamiento del horno y secado de la madera ya calculados, más las debidas a consumos generales, como pérdidas en las redes eléctricas, iluminación del interior del horno, y otros. Todas ellas calculadas como porcentajes de los consumos anteriormente señalados.

7.2 Consumo de energía térmica

Esta energía debe ser suministrada por las resistencias según la expresión 5.32. Con los resultados de la tabla 5.32 a 5.36 se tiene el consumo de energía en cada periodo cuyos resultados se presentan en la tabla 7.1

Tabla 7.1 Energía suministrada por las resistencia eléctricas

Periodo	Componentes	Madera	Pérdidas	Secado de	Aire de	Sub total
	Paredes techo, piso	agua y carritos	cubierta exterior	Madera	Secado	
	Calentamiento		Celentam. Secado	Secado		
	kW-h	Kw-h	kW-h	kW-h	kW-h	kW-h
Arranque	263	2765	93			3121
MA			93	532	172,7	797
MB	30	212	221	1036	290,9	1790
MC	60	208	388	1259	367,3	2282
MD	60	102	445	991	302,5	1900
ME	66	203	506	480	12,9	1267
Total	479	3490	1746	4297	1146	11159

7.3 Consumo de energía de ventiladores

$$E_v = P_v t \quad (7.1)$$

P_v = Potencia de los ventiladores, kW

t = Tiempo de operación de los ventiladores, h

Los resultados se presentan en la tabla 7.2

Tabla 7.2 Potencia y energía de ventiladores

Periodo	Ventiladores		
	Tiempo	Potencia	Energía
	H	kW	kW-h
Arranque	20	1,5	30
MA	10	1,5	15
MB	20	1,5	30
MC	30	1,5	46
MD	30	1,5	46
ME	30	1,5	46
Total			213

7.4 Otros consumos de energía

Además de los consumos de energía ya determinados se deben considerar otros, como las pérdidas eléctricas en la red, consumos para iluminación y cargas libres, calentamiento del aislamiento térmico y de accesorios como ventiladores, ejes, y una reserva para excesos de peso de carritos portapilas. También para la producción de vapor para la corrección de fallas.

Las pérdidas eléctricas no son significativas porque los cables alimentadores son cortos. Para producción de vapor para corrección de fallas se toma el 5 % del periodo inicial. Las cargas de iluminación en el interior del horno en casos de inspección son muy pequeñas. Teniendo en cuenta todos los aspectos mencionados anteriormente se toma un consumo global de 406 kw-h.

7.3 Energía total y eficiencia del horno

La energía total de secado es la suma de las energías consumidas en cada periodo, tanto en las resistencias de calentamiento como en los ventiladores. Según en la etapa de calentamiento como en la de seca.

Para determinar la eficiencia total del secado se considera como energía útil la que corresponde al secado, con la cual se determina la eficiencia total como:

$$E_F = 100 \cdot E_U / E_T \quad (7.2)$$

E_F = Eficiencia total

E_U = Energía de secado, kW-h

E_T = Energía total, kW-h

Los resultados se muestran en la tabla 7.4, donde se ve que la eficiencia total es del 33 %.

Para determinar la eficiencia total del secado se considera como energía útil la que corresponde al secado, con la cual se determina la eficiencia total como:

$$E_F = 100 \cdot E_U / E_T \quad (7.3)$$

E_F = Eficiencia total

E_U = Energía de secado, kW-h

E_T = Energía total, kW-h

Los resultados se muestran en la tabla 7.4, donde se ve que la eficiencia total es del 33. %.

También se observa que las eficiencias parciales en cada periodo son continuamente decrecientes en el rango de 65,4 al 36,5 %.

Se observa también que el consumo de energía para el calentamiento de la madera, el agua que contiene y los carritos de soporte es de 3490 kW-hr mientras que la energía para secar la madera es de 4297 kW-hr. Esto significa que si se tuviera un horno teórico sin pérdidas la eficiencia máxima que se obtendría sería de 55 %.

Tabla 7.3 Energía total y eficiencia del horno

Periodo	Resistencia	Ventiladores	Total	Eficiencia
	kW-h	kW-h	kW-h	Periodo
				%
Arranque	3121	30	3152	0
MA	797	15	813	65,4
MB	1790	30	1821	56,9
MC	2282	46	2328	54,1
MD	1900	46	1946	50,9
ME	1267	46	1313	35,5
Total	11159	213		
Total del Programa			11372	
Otros			406	
Consumo Total del Horno			11778	
Consumo en el secado			4297	
Eficiencia total			%	36

CAPITULO VIII

EVALUACION DE COSTOS

8.1 Inversión en edificaciones

Como ya se cuenta con un edificio del que se va a utilizar una parte para construir el horno, las obras civiles no serán muy grandes, limitándose a las modificaciones siguientes:

Ampliación de las puertas existentes, de 3 x 2,5 m a 5,3 x 3,8 m así como la construcción de su correspondiente dintel.

Construcción de una pared interior de 10,6 x 4,60 m para separar el área del horno del resto del edificio, con un muro de ladrillo KK con tarrajeo de cemento por ambas caras, sobre base de cimientos corridos.

Construcción del piso del horno, con una loza de concreto simple de 5,30 x 10,6 m de 0,20 m, con cuatro sardineles guías 0,30 x 0,08 m y 9,96 m de longitud, para los carritos. Estos se implementarán con ruedas metálicas que rodarán sobre rieles.

.Construcción de cuatro escaleras de gato para subir al falso techo de la cámara de secado.

Construcción del falso techo del horno

Apertura de las ventilas y agujeros pasantes para los ejes de los ventiladores.

Instalación de los electroductos de todos los circuitos eléctricos.

Instalación del aislamiento térmico en las paredes interiores del horno.

Instalación de puertas y ventilas.

Cableado e instalación de resistencias eléctricas e instrumentos.

METRADO Y PRESUPUESTO DE OBRAS CIVILES

Item	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Precio Parcial	Costo Total
		uu		\$	\$	\$
1.0	Obras civiles					
1.1	Excavaciones	m3	32,15	3	96,449	
1.2	Nivelación de terreno	m2	107,17	1	107,17	
1.3	Muros de ladrillo KK de cabeza, tarrajado por ambas caras	m2	47,00	20	940	
1.4	Cimientos corridos de concreto simple Piso de concreto simple, de 0.2m de espesor y rieles para carritos	m3	2,00	20	40	
1.5	Vanos para puertas	m2	53,58	20	1071,7	
1.6	Vanos para puertas	m3	1,00	20	20	
1.7	Falso techo 54 Listones de madera de 0.3x3.37 m de una pulgada de espesor (11 pies tablares)	pt	596,77	0,35	208,87	
1.8	54 Listones de madera de 0.3x3.37 m de 1/2 pulgada de espesor (5.5 pies tablares)	pt	298,39	0,35	104,44	
1.9	9 Listones de madera de (19.46 0.06x0.132x5.8 m pt)	pt	175,12			
1.10	Puertas de madera de dos hojas, de 5.3 de ancho, 3.8 de altura y 0.05 m de espesor cada una con una pequeña puerta de servicio para inspecciones y toma de muestras y puertas de servicio al ducto de ventiladores	pt	427	0,35	149,29	
1.11	Aislamiento térmico Listones de madera de 25.4mm de ancho Y longitud variable	pt	5316,40	0,35	1860	
1.12	Fibra de vidrio de 50 mm de espesor	kg	6,95	1,2	8,3344	
1.13	Agujeros para ventilas	uu	24	3	72	
	TOTAL					4678,94

8.2 Inversión en equipos

Las inversiones en equipos se realiza para adquirir equipos de origen nacional como los ventiladores y las ventilas y accesorios mecánicos. Las resistencias eléctricas, el equipo eléctrico asociado y los instrumentos de medición son de origen importado. Todos estos equipos están disponibles en el mercado local y no requieren importación directa.

METRADO Y PRESUPUESTO DE MAQUINARIA Y EQUIPO

Item	Descripción	Unidad uu	Cantidad	Costo Unitario \$	Precio Parcial \$	Costo Total \$
2.00	Maquinaria y equipo					
2.1	Ventiladores axiales tipo placa, VAF 600, de Q=4,02 m ³ /s y H = 10 mmca, con motor eléctrico de accionamiento directo	uu	6	650	3900	
2.2	Base para soporte de motores adosable al techo	uu	6	40	240	
2.3	Ventilas	uu	24	50	1200	
2.4	Carritos de soporte de pilas, de 1,25 m de ancho y de 2,9 y 4,1 m de longitud.	uu	9	600	5400	
2.5	Motores de paso, de 200 pasos, 12 V, 36 W, CC para accionar ventilas	uu	24	40	960	
2.6	Tarjeta de control de motores de paso	uu	12	120	1440	
2.7	Intrumentos de medición Medidor digital de temperatura de bulbo seco y temperatura de bulbo húmedo	uu	4	200	800	
2.8	Resistencia electricas Ni Cr 3020 de 5mm	m	720	2	1440	
2.9	Tablero eléctrico	uu	1	120	120	
2.10	Instalaciones eléctricas	uu	1	600	600	
						16600

8.3 Inversión total.

La inversión total es:

	US\$
Obras Civiles	4 678
Maquinaria y Equipo	<u>16 600</u>
Costo total	20 778
Instalaciones y montajes	5 261
Gastos generales	<u>2 435</u>
Costo total	28 474

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 1.- Como resultado de los diseños realizados se observa que tanto las dimensiones como la potencia instalada están en el orden de magnitud de los hornos de tamaños comerciales.
- 2.- El horno está en condiciones de adecuarse a los requerimientos de los programas de secado requierexn temperatura menores a los 75 °C porque para el diseño de sus componentes se ha tomado como parámetros de diseño las condiciones más críticas que se presentan en los diferentes períodos del programa moderado de la JUNAC.
- 3.- Se ha obtenido un horno que siempre puede operar con la velocidad de aire de secado óptima, para lo que se regula el caudal del ventilador. La potencia de las resistencias y la apertura de las ventilas se regulan de forma manual, aunque en una segunda etapa se pueden automatizar.
4. El aislamiento térmico es indispensables porque al comparar las perdidas de energía por la cubierta exterior, sin aislamiento y con aislamiento se tiene una reducción por es del orden del 40 % de dichas pérdidas.
- 5- El horno opera en un 50 % del tiempo con secado a velocidad constante y el otro 50 % con secado a velocidad variable. Los resultados muestran que durante el 50 % del tiempo de secado la humedad de la madera se reduce del 25 al 20 %, lo que indica que el secado se realiza a velocidad constante,

y en las últimas 60 horas a humedad se reduce hasta el 14.9 %, con velocidad de secado decreciente.

6.- En el 50 % inicial del periodo de secado se elimina el 65 % del total del agua y en el 50 % final se elimina el 35 % restante.

7- Las eficiencias de secado son continuamente decrecientes desde un máximo de 65 % para el periodo inicial, el más corto pues solo dura 10 horas, hasta un 35 % en el último periodo que dura 30 horas. La eficiencia mínima se produce en el periodo de calentamiento del horno de 20 horas, donde como no hay secado la eficiencia es cero.

8.- La eficiencia total del horno es 36 %, . La causa principal es el calentamiento inicial, en especial de la propia madera húmeda. El aislamiento térmico mejora el rendimiento del horno pero no es la causa principal de la baja eficiencia.

9.-Se recomienda continuar el desarrollo de la tecnología propia de hornos de alta temperatura considerando la automatización de los sistemas de control.

10.- Se recomienda difundir los conocimientos del diseño de hornos a nivel de PYMES, pues la industria maderera nacional utiliza hornos importados debido a la falta de fabricantes nacionales, pero con la contribución de este y otros trabajos podrían aparecer fabricantes nacionales que puedan aprovechar la oportunidad de producir hornos para una industria maderera que cada día toma mayor importancia económica en el país.

BIBLIOGRAFIA

LIBROS

- 1.- Semabois.
“Como diseñar una célula de secado”
Boletín de información Técnica
Rioger Roanne. France 1977
- 2.- Toledo Gonzáles, P
“Estudio del secado artificial de Cumala a escala industrial”.
Tesis de grado. Ing. Forestal.
UNA. Lima, Perú. 1972
- 3.- Hildebrand, Robert.
“Kiln drying of saw timber.”
Nuertingen, Alemania 1970.
- 4.- Osborne Williams
Pergamon Aresa
Londres. Inglaterra. 1966.
- 5.- Cúneo Lobiano y Pen Ku Chisen.
“Diseño de un horno para secado de madera de 15 Ton de capacidad”.
PUC. Lima, Perú. 1980
- 6.- Moisés Ayona León.
“Instalación de un secador de madera en Pucallpa”
Tesis de Grado. Ing. Química UNMSM. Lima, 1961

- 7.- Edgar Catácora Acevedo.
“Utilización de energía solar en el diseño de un horno para secar madera de 15000 pt.”
Tesis de Grado ing. Mecánica UNI. Lima, 1984
- 8.- Raúl Gonzáles Flores.
“Estudio sobre el secado de la madera en el Perú”. Proyecto PNUD/FAO/PER78/003 “Mejoramiento de los sistemas de extracción y transporte forestal.”
- 9.- Theodore Baumeister, Eugene A Avallone, Theodore Baumeister III
“Marks, Manual del Ingeniero Mecánico” Octava Edición.
Editorial McGraw-Hill, México.
ISBN 968-451-642-8 volumen II
- 10.- Robert H. Perry, Don W. Green, James O Maloney.
“Manual del Ingeniero Químico”, Sexta Edición.
Editorial McGraw-Hill / Interamericana de México S.A. de C.V. 1993
ISBN 968-422-096-0 obra completa.
- 11.- Frank P. Incropera, David P. De Witt.
“Fundamentos de transferencia de calor”. Cuarta Edición.
Editorial Prentice Hall. México. 1999
ISBN 970-17-0170-4
- 12.- Gilberto Enríquez Harper.
“Manual de instalaciones eléctricas residenciales e industriales”
Segunda Preedición.
Editorial LIMUSA México .1980
ISBN 968- 18-0537-2

13.- Virgil Moring Fairez

“Diseño de elementos de máquinas” Cuarta Edición.

Editorial Limusa Editores. México.1985.

14.- Robert Nonnast.

“El proyectista de estructuras metálicas” Vigésimo primera Edición.

Editorial Paraninfo 2000 .Madrid. España.

15.- American Society of Heating Refrigerations and Air Conditions
Engineers.

ASHRAE Handbook Products Directory 1977 Fundamentals.

New York USA 1977

CATALOGOS Y REVISTAS

16.- Catálogo Aceros BOHELER.

“Manual de Aceros Especiales.

Editado por Aceros Boheler del PerúS.A. Lima, Perú.

17. Catálogo SKF Nº 4000 Sp

“Catálogo General”.

Impreso en Italia por Stamperia Artistica Nazionale, 1989

18. Catálogo EBERLE. Cód.3031J91030

“Motores Eléctricos Trifásico para uso Industrial-IEC”

Editado por Eberle S.A. , Caxias do Sul, Brasil.

19.- Catálogo DELCROSA.

“Motores Eléctricos Trifásicos, desde 0.3HP hasta 310 HP”

Editado por Construcciones Eléctromecánicas Delcrosa S.A., Lima.
Perú

ANEXO

Propiedades del aire

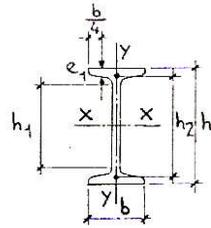
T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg · K)	$\mu \cdot 10^7$ (N · s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
Aire							
100	3.5562	1.032	71.1	2.00	9.34	2.54	0.78
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.75
200	1.7458	1.007	132.5	7.590	18.1	10.3	0.73
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	15.9	0.72
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.70
350	0.9950	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.70
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.69
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.3	47.2	0.68
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.68
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.68
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.68
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.69
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	98.0	0.69
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	109	0.70
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	120	0.70
850	0.4097	1.110	384.3	93.80	59.6	131	0.71
900	0.3868	1.121	398.1	102.9	62.0	143	0.72
950	0.3666	1.131	411.3	112.2	64.3	155	0.72
1000	0.3482	1.141	424.4	121.9	66.7	168	0.72
1100	0.3166	1.159	449.0	141.8	71.5	195	0.72
1200	0.2902	1.175	473.0	162.9	76.3	224	0.72
1300	0.2679	1.189	496.0	185.1	82	238	0.71
1400	0.2488	1.207	530	213	91	303	0.70
1500	0.2322	1.230	557	240	100	350	0.68
1600	0.2177	1.248	584	268	106	390	0.68
1700	0.2049	1.267	611	298	113	435	0.68
1800	0.1935	1.286	637	329	120	482	0.68
1900	0.1833	1.307	663	362	128	534	0.67
2000	0.1741	1.337	689	396	137	589	0.67
2100	0.1658	1.372	715	431	147	646	0.66
2200	0.1582	1.417	740	468	160	714	0.65
2300	0.1513	1.478	766	506	175	783	0.64
2400	0.1448	1.558	792	547	196	869	0.63
2500	0.1389	1.665	818	589	222	960	0.61
3000	0.1135	2.726	955	841	486	1570	0.53
Amoniaco (NH ₃)							
300	0.6894	2.158	101.5	14.7	24.7	16.6	0.88
320	0.6448	2.170	109	16.9	27.2	19.4	0.87
340	0.6059	2.192	116.5	19.2	29.3	22.1	0.87
360	0.5716	2.221	124	21.7	31.6	24.9	0.87
380	0.5410	2.254	131	24.2	34.0	27.9	0.86

Propiedades del agua

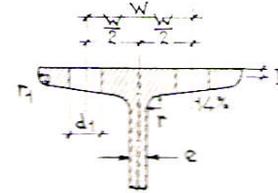
TABLA A.6 Propiedades termofísicas de agua (líquida)

Temperatura, T (K)	Presión P (bars) ^a	Volumen específico (m ³ /kg)		Entalpia de vaporización h_{fg} (kJ/kg)	Calor específico (kJ/kg · K)		Viscosidad (N · s/m ²)		Conductividad térmica (W/m · K)		Número de Prandtl		Tensión superficial $\sigma_f \cdot 10^1$ (N/m)	Coeficiente de expansión $\beta_f \cdot 10^6$ (K ⁻¹)	Temperatura T (K)
		$v_f \cdot 10^3$	v_g		$c_{p,f}$	$c_{p,g}$	$\mu_f \cdot 10^6$	$\mu_g \cdot 10^6$	$k_f \cdot 10^3$	$k_g \cdot 10^3$	Pr_f	Pr_g			
273.15	0.00611	1.000	206.3	2502	4.217	1.854	1750	8.02	569	18.2	12.99	0.815	75.5	-68.05	273.15
275	0.00697	1.000	181.7	2497	4.211	1.855	1652	8.09	574	18.3	12.22	0.817	75.3	-32.74	275
280	0.00990	1.000	130.4	2485	4.198	1.858	1422	8.29	582	18.6	10.26	0.825	74.8	46.04	280
285	0.01387	1.000	99.4	2473	4.189	1.861	1225	8.49	590	18.9	8.81	0.833	74.3	114.1	285
290	0.01917	1.001	69.7	2461	4.184	1.864	1080	8.69	598	19.3	7.56	0.841	73.7	174.0	290
295	0.02617	1.002	51.94	2449	4.181	1.868	959	8.89	606	19.5	6.62	0.849	72.7	227.5	295
300	0.03531	1.003	39.13	2438	4.179	1.872	855	9.09	613	19.6	5.83	0.857	71.7	276.1	300
305	0.04712	1.005	29.74	2426	4.178	1.877	769	9.29	620	20.1	5.20	0.865	70.9	320.6	305
310	0.06221	1.007	22.93	2414	4.178	1.882	695	9.49	628	20.4	4.62	0.873	70.0	361.9	310
315	0.08132	1.009	17.82	2402	4.179	1.888	631	9.69	634	20.7	4.16	0.883	69.2	400.4	315
320	0.1053	1.011	13.98	2390	4.180	1.895	577	9.89	640	21.0	3.77	0.894	68.3	436.7	320
325	0.1351	1.013	11.06	2378	4.182	1.903	528	10.09	645	21.3	3.42	0.901	67.5	471.2	325
330	0.1719	1.016	8.82	2366	4.184	1.911	489	10.29	650	21.7	3.15	0.908	66.6	504.0	330
335	0.2167	1.018	7.09	2354	4.186	1.920	453	10.49	656	22.0	2.88	0.916	65.8	535.5	335
340	0.2713	1.021	5.74	2342	4.188	1.930	420	10.69	660	22.3	2.66	0.925	64.9	566.0	340
345	0.3372	1.024	4.683	2329	4.191	1.941	389	10.89	668	22.6	2.45	0.933	64.1	595.4	345
350	0.4163	1.027	3.846	2317	4.195	1.954	365	11.09	668	23.0	2.29	0.942	63.2	624.2	350
355	0.5100	1.030	3.180	2304	4.199	1.968	343	11.29	671	23.3	2.14	0.951	62.3	652.3	355
360	0.6209	1.034	2.645	2291	4.203	1.983	324	11.49	674	23.7	2.02	0.960	61.4	697.9	360
365	0.7514	1.038	2.212	2278	4.209	1.999	306	11.69	677	24.1	1.91	0.969	60.5	707.1	365
370	0.9040	1.041	1.861	2265	4.214	2.017	289	11.89	679	24.5	1.80	0.978	59.5	728.7	370
373.15	1.0133	1.044	1.679	2257	4.217	2.029	279	12.02	680	24.8	1.76	0.984	58.9	750.1	373.15
375	1.0815	1.045	1.574	2252	4.220	2.036	274	12.09	681	24.9	1.70	0.987	58.6	761	375
380	1.2869	1.049	1.337	2239	4.226	2.057	260	12.29	683	25.4	1.61	0.999	57.6	788	380
385	1.5233	1.053	1.142	2225	4.232	2.080	248	12.49	685	25.8	1.53	1.004	56.6	814	385

Propiedades de los perfiles



Para agujeros de $\phi < d_1$ se tomará la misma distancia W



h_2 distancia entre los centros de gravedad de las alas

Perfil I	Dimensiones en mm.							Sección cm ²	Peso Kg/m	Gravil y diám. norm		Refs. eje x-x			Refs. eje y-y			I _z cm ⁴
	h	b	e = r	e ₁	r ₁	h ₁	p			W mm.	d ₁ mm.	I _x cm ⁴	R _x cm ³	i _x cm	I _y cm ⁴	R _y cm ³	i _y cm	
8	80	42	3,9	5,9	2,3	59	2,2	7,58	5,95	22	-	77,8	19,5	3,20	6,12	3,00	0,99	6,64
10	100	50	4,5	6,8	2,7	75	2,5	10,5	8,32	26	-	171	34,2	4,01	12,2	3,4	1,1	10,9
12	120	58	5,1	7,7	3,1	92	2,8	14,2	11,2	30	-	328	54,7	4,81	21,1	4,1	1,2	14,0
14	140	66	5,7	8,6	3,4	109	3,1	18,3	14,4	34	11	573	81,9	5,61	33,1	4,7	1,4	18,0
16	160	74	6,3	9,5	3,8	125	3,3	22,8	17,9	38	13	935	117	6,40	44,1	5,0	1,5	22,0
18	180	82	6,9	10,4	4,1	142	3,6	27,9	21,9	44	13	1450	161	7,20	61,1	5,6	1,7	28,0
20	200	90	7,5	11,3	4,5	159	4,0	33,5	26,3	48	17	2140	214	8,00	84,1	6,0	1,9	36,0
22	220	98	8,1	12,2	4,9	175	4,3	39,6	31,1	52	17	3060	278	8,80	117,1	6,4	2,1	44,0
24	240	106	8,7	13,1	5,2	192	4,6	46,1	36,2	56	17	4250	354	9,60	161,1	6,8	2,3	54,0
26	260	113	9,4	14,1	5,6	208	5,0	53,4	41,9	58	21	5740	442	10,4	221,1	7,2	2,5	66,0
28	280	119	10,1	15,2	6,1	225	5,4	61,1	48,0	62	21	7530	542	11,1	299,1	7,6	2,7	80,0
30	300	125	10,8	16,2	6,5	241	5,9	69,1	54,2	64	21	9800	653	11,9	401,1	8,0	2,9	96,0
32	320	131	11,5	17,3	6,9	257	6,4	77,8	61,1	70	21	12510	782	12,7	531,1	8,4	3,1	114,0
34	340	137	12,2	18,3	7,3	274	6,9	86,8	68,1	74	23	15700	923	13,5	691,1	8,8	3,3	134,0
36	360	143	13,0	19,5	7,8	290	7,3	97,1	76,2	77	23	19610	1090	14,2	881,1	9,2	3,5	156,0
38	380	149	13,7	20,5	8,2	306	8,0	107	84,2	80	23	24010	1260	15,0	1101,1	9,6	3,7	180,0
40	400	155	14,4	21,6	8,6	323	8,3	118	92,6	84	23	29210	1460	15,7	1401,1	10,0	3,9	206,0
42	425	163	15,3	23,0	9,2	343	8,9	132	104	86	25	36970	1740	16,7	1740,1	10,4	4,1	234,0
45	450	170	16,2	24,3	9,7	363	9,5	147	115	92	25	45850	2040	17,7	2210,1	10,8	4,3	264,0
47	475	178	17,1	25,6	10,3	384	9,9	163	128	96	26	56450	2380	18,6	2810,1	11,2	4,5	296,0
50	500	185	18,0	27,0	10,8	404	10,6	180	141	100	26	69740	2750	19,6	3540,1	11,6	4,7	330,0