

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO TÉRMICO DE UN HORNO PARA SECADO DE MADERA CON UNA CAPACIDAD DE 23 METROS CÚBICOS AL MES

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

RICARDO DAVID COYAGO TOAPANTA

ric_mecanic@hotmail.com

DIEGO JAVIER CRIOLLO CAJAMARCA

djcmaster@hotmail.com

DIRECTOR: MSC. ANGEL PORTILLA

angel.portilla@epn.edu.ec

Quito, Octubre 2013

DECLARACIÓN

Nosotros, RICARDO DAVID COYAGO TOAPANTA y DIEGO JAVIER CRIOLLO CAJAMARCA, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos los derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por normativa institucional vigente.

Ricardo David Coyago Toapanta

Diego Javier Criollo Cajamarca

CERTIFICACIÓN

Certifico que bajo mi dirección, el presente proyecto de titulación fue realizado en su totalidad por los señores: RICARDO DAVID COYAGO TOAPANTA y DIEGO JAVIER CRIOLLO CAJAMARCA.

Ing. Ángel Portilla
DIRECTOR DEL PROYECTO

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a toda mi familia debido a que ellos me apoyaron en todo momento, fueron mis guías dándome fortaleza para seguir adelante, enseñándome a salir de las adversidades que se presentan, también dedico este trabajo a Gaby que se ha convertido en mi inspiración y al futuro integrante de mi familia.

A mi padre que me supo guiar y aconsejar en todo momento, me apoyo incluso en las peores circunstancias siempre supo cómo educarme y por enseñarme a tener fe cuando se presentan problemas.

A mi madre que me cuidó como su mayor tesoro, de igual manera que lo hizo con todos sus hijos, por su sacrificio por su entrega para sacar adelante a toda su familia.

A mi abuelito que hubiera estado muy feliz por este logro que he alcanzado, sin embargo sé que me va a estar guiando desde el cielo, gracias abuelito por todos los consejos que me diste.

A mis hermanos con los que soñamos un mejor futuro para nuestra familia.

Diego

Dedico este proyecto a mi papá Vicente Pualasin quien me dio su apoyo incondicional, su constante dedicación y confianza, ya que sin él jamás podría haber llegado a ser un profesional y una persona de bien, él con su ejemplo demostró que un padre no es el que engendra sino el que brinda y da todo su cariño.

Ricardo

AGRADECIMIENTOS

A dios por darme salud y vida para poder alcanzar uno de los objetivos de mi vida.

A los profesores de la Facultad de Ingeniería Mecánica ya que ellos impartieron todos sus conocimientos sin egoísmo y esperando que aprovechemos al máximo todas sus enseñanzas.

Al Ing. Ángel Portilla por todo su apoyo y conocimiento que permitió el desarrollo del proyecto.

A mis amigos de la universidad con los cuales compartí muchas experiencias en las aulas y siempre estuvieron prestos a ayudar con cualquier problema que se presentaba.

Diego Javier Criollo Cajamarca

A Dios por ser mi guía y fortaleza en los momentos más difíciles de mi vida.

Agradezco a mis padres (Vicente y Lourdes) que siempre me han sabido apoyar y comprender en todo este tiempo, a ellos que nunca me dejaron rendir ante las dificultades y siempre supieron darme su fuerza cuando más lo necesite.

A la persona que se convirtió en mi compañera de vida, por brindarme siempre su cariño, apoyo y por la fe que desde un principio deposito en mí.

A mis amigos que han hecho que estos años sean muy agradables y llevaderos. Gracias por cada uno de los momentos vividos.

A nuestro Director de Tesis Ing. Ángel Portilla por su paciencia y apoyo en la realización de este proyecto.

Ricardo David Coyago Toapanta

CONTENIDO

ÍNDICE

DECLARACIÓN.....	i
CERTIFICACIÓN.....	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
CONTENIDO	v
ÍNDICE.....	v
CONTENIDO DE FIGURAS.....	xii
CONTENIDO DE TABLAS	xv
RESUMEN.....	xix
PRESENTACIÓN	xx
CAPÍTULO 1.....	1
MÉTODOS DE SECADO DE MADERA	1
1.1. SECADO NATURAL AL AIRE.....	1
1.1.1. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.....	1
1.1.2. VENTAJAS DEL SECADO NATURAL	2
1.1.3. DESVENTAJAS DEL SECADO NATURAL.....	2
1.2. SECADO ARTIFICIAL DE LA MADERA.....	3
1.2.1. SECADORES DE CONVECCIÓN	5
1.2.1.1. Principio de funcionamiento.....	5
1.2.1.2. Ventajas de los secadores de convección.	5
1.2.1.3. Desventajas de los secadores de convección.	5
1.2.2. SISTEMA DE CONDENSACIÓN.....	7
1.2.2.1. Principio de funcionamiento.....	7
1.2.2.2. Ventajas del sistema de condensación.	8
1.2.2.3. Desventajas del sistema de condensación.	8
1.2.3. SECADORES DE ENERGÍA SOLAR.....	9
1.2.3.1. Principio de funcionamiento.....	9
1.2.3.2. Ventajas de los secadores de energía solar.	9
1.2.3.3. Desventajas de los secadores de energía solar.	9

1.2.4.	SECADORES AL VACÍO	10
1.2.4.1.	Principio de funcionamiento	10
1.2.4.2.	Ventajas de los secadores al vacío.	12
1.2.4.3.	Desventajas de los secadores al vacío.	12
1.2.5.	SECADORES POR RADIO FRECUENCIA.....	12
1.2.5.1.	Principio de funcionamiento.....	12
1.2.5.2.	Ventajas de los secadores por radio frecuencia.	13
1.2.5.3.	Desventajas de los secadores por radio frecuencia.....	13
CAPÍTULO 2	14
ESTUDIO DE LOS PARAMETROS INVOLUCRADOS DURANTE EL SECADO DE MADERA.....		14
2.1.	AIRE HÚMEDO.....	14
2.1.1.	TEMPERATURA DE BULBO SECO.....	14
2.1.2.	TEMPERATURA DE BULBO HUMEDO.....	14
2.1.3.	HUMEDAD ESPECIFICA DEL AIRE	15
2.1.4.	HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE	16
2.1.5.	VELOCIDAD DEL AIRE	16
2.1.6.	CARTA PSICROMÉTRICA	17
2.2.	HUMEDAD EN LA MADERA.....	17
2.2.1.	CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA MADERA Y SU DETERMINACIÓN ...	18
2.2.2.	EL AGUA EN LA MADERA	18
2.2.2.1.	Agua libre	19
2.2.2.2.	Agua ligada	19
2.2.3.	HUMEDAD DE LA MADERA EN ESTADO VERDE	20
2.2.4.	PUNTO DE SATURACIÓN DE LAS FIBRAS	20
2.2.5.	CONTENIDO DE HUMEDAD DE EQUILIBRIO DE LA MADERA	21
2.2.6.	DENSIDAD DE LA MADERA.....	21
2.3.	ANISOTROPÍA DE LA HINCHAZÓN Y CONTRACCIÓN	23
2.3.1.	CÁLCULO DE HINCHAZÓN Y CONTRACCIÓN	24
2.3.1.1.	Efectos de la Anisotropía Durante el Secado de la Madera	25
2.4.	MOVIMIENTO MIGRATORIO DEL AGUA EN LA MADERA	25
2.4.1.	FUERZAS CAPILARES	26
2.4.2.	FUERZAS DEBIDO A DIFERENCIAS EN LA PRESIÓN DE VAPOR.....	27

CAPÍTULO 3.....	28
DESARROLLO DEL MÉTODO DE SECADO EN HORNO	28
3.1. ETAPAS DEL PROCESO DE SECADO	28
3.1.1. ETAPA DE CALENTAMIENTO DEL HORNO Y MADERA.....	28
3.1.1.1. Calentamiento de los materiales que componen el horno	28
3.1.1.2. Calor para el calentamiento de los materiales de la estructura	29
3.1.1.3. Calentamiento de la madera húmeda.....	30
3.1.1.3.1. <i>Calor para el calentamiento de la madera</i>	30
3.1.1.3.2. <i>Calor específico de la madera</i>	30
3.1.1.3.3. <i>Tiempo de calentamiento</i>	32
3.1.1.4. Calentamiento de los espaciadores	32
3.1.2. ETAPA DE EVAPORACIÓN DEL AGUA EN LA MADERA	33
3.1.2.1. Curvas de contenido de humedad de equilibrio	33
3.1.2.2. Tiempo de secado.....	34
3.1.2.3. Tiempo de secado corregido	37
3.1.2.4. Curvas de secado	37
3.1.2.5. Agua en la madera a evaporar	38
3.1.2.5.1. <i>Agua a evaporar para un contenido de humedad de 80 a 30 %</i> ... 38	
3.1.2.5.2. <i>Agua a evaporar para un contenido de humedad de 30 a 12 %</i> ... 39	
3.1.2.6. Programa de secado.....	40
3.1.2.6.1. <i>Horarios de Secado Practicados por el Pacto Andino en Maderas</i>	41
3.1.2.6.2. <i>Desarrollo del programa de secado</i>	42
3.1.2.6.3. <i>Tiempo de cada paso del programa de secado</i>	47
3.1.3. ETAPA DE ACONDICIONAMIENTO	52
3.1.4. ETAPA DE ENFRIAMIENTO	52
CAPÍTULO 4.....	53
DISEÑO DEL HORNO PARA SECADO DE MADERA	53
4.1. DIMENSIONAMIENTO DE LA CÁMARA DE SECADO	54
4.1.1. DIMENSIONES DEL TABLON DE MADERA.....	54
4.1.2. DIMENSIONAMIENTO DE LOS SEPARADORES	55
4.1.3. APILAMIENTO DE LA MADERA	55
4.2. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL HORNO	58

4.2.1. MATERIALES DEL CUAL SE COMPONEN EL HORNO DE SECADO.....	58
4.2.1.1. Constitución de las paredes del horno	59
4.2.1.1.1. Mortero.....	60
4.2.1.1.2. Ladrillo (<i>mampuesto</i>).....	60
4.2.1.2. Puerta	61
4.2.1.3 Dimensionamiento del aislante de las puertas del horno.....	62
4.2.1.4. Cielo falso.....	65
4.3. DIMENSIONES FINALES DE LA CÁMARA DE SECADO.....	67
4.3.1. OBRA CIVIL.....	69
4.4. DISEÑO TÉRMICO DEL HORNO PARA SECADO DE MADERA	69
4.4.1. PARÁMETROS DE DISEÑO	69
4.4.2. FLUJO DE CALOR PARA CALENTAMIENTO DE LA MADERA HÚMEDA	70
4.4.3. FLUJO DE CALOR PARA CALENTAMIENTO DE LOS ESPACIADORES	72
4.4.4. CALENTAMIENTO DEL AIRE QUE SE ENCUENTRA EN EL INTERIOR DEL HORNO	73
4.4.5. CALENTAMIENTO DE LA ESTRUCTURA DEL HORNO.....	77
4.5. CALOR PARA EVAPORAR EL AGUA DE LA MADERA EN LA ETAPA DE SECADO.....	81
4.5.1. PESO ANHÍDRIDO DE LA MADERA	81
4.5.1.1. Masa de agua a eliminar.....	81
4.5.1.2. Calor para evaporar el agua libre(etapa de 80% hasta 30% CH).....	82
4.5.1.3. Calor para evaporar el agua ligada(etapa de 30% hasta 12% CH).....	83
4.5.2. TIEMPO DE SECADO.....	84
4.5.2.1. Factores de corrección del tiempo de secado para maderas frondosas	84
4.5.3. FLUJO DE CALOR PARA EVAPORAR EL AGUA	87
4.5.4. FLUJO DE CALOR PERDIDO POR LAS PAREDES DE LA ESTRUCTURA	88
4.5.5. ANÁLISIS DE RESISTENCIA TÉRMICA.....	88
4.5.5.1. Paredes laterales	88
4.5.6. COEFICIENTE DE CONVECCIÓN DEL AIRE EXTERIOR.....	89
4.5.6.1. Parámetros adimensionales del aire exterior	89
4.5.6.1.1. Número de Reynolds.....	89

4.5.6.1.2. Número de Prandtl.....	90
4.5.6.2. Cálculo del coeficiente de convección promedio del aire exterior	90
4.5.6.3. Cálculo de los parámetros involucrados en la transferencia de calor por convección aire exterior	91
4.5.6.3.1. Coeficiente convectivo externo a la temperatura de película del aire frío	93
4.5.7. AIRE INTERIOR.....	93
4.5.7.1. Parámetros adimensionales aire interior	94
4.5.7.1.1. Coeficiente de convección a la temperatura de película del fluido caliente	95
4.5.8. CÁLCULO DE LA RESISTENCIA TÉRMICA DE LA MAMPOSTERÍA.....	95
4.5.9. CÁLCULO DEL CALOR PERDIDO POR LAS PAREDES LATERALES.....	97
4.5.10. CÁLCULO DE LAS TEMPERATURAS EN LAS SUPERFICIES	98
4.5.10.1. Temperatura superficie externa	98
4.5.10.1.1. Temperatura exterior	99
4.5.10.1.2. Temperatura interior	99
4.5.11. RECÁLCULO DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL DE LA PARED INTERNA Y EXTERNA.....	100
4.5.12. RESULTADOS OBTENIDOS PAREDES LATERALES	100
4.5.13. RESULTADOS OBTENIDOS TECHO	102
4.5.14. RESULTADOS OBTENIDOS PARA LAS PUERTAS	103
4.6. RESULTADO DE CALOR ENTREGADO POR ETAPAS.....	104
4.6.1. REACCIÓN DE COMBUSTIÓN LPG-AIRE.....	106
4.6.2. RELACIÓN AIRE-COMBUSTIBLE (exceso de aire del 30%).....	106
4.6.3. REACCIÓN DE COMBUSTIÓN CONSIDERANDO LA CANTIDAD DE HUMEDAD.....	107
4.6.4. PUNTO DE ROCIÓ DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN	108
4.6.5. TEMPERATURA DE FLAMA ADIABÁTICA	109
4.7.1. Peso Molecular	112
4.7.2. DENSIDAD	113
4.7.3. CALOR ESPECÍFICO	113
4.7.4. VISCOSIDAD.....	114
4.7.6. NÚMERO DE PRANDTL.....	117
4.8. CAUDAL DE AIRE NECESARIO	118

4.9.	CONSUMO DE COMBUSTIBLE	124
4.9.1.	CANTIDAD DE COMBUSTIBLE TOTAL	125
4.9.2.	CAUDAL MÁSSICO DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN.....	126
4.9.3.	CAUDAL MÁSSICO DE AIRE NECESARIO PARA LA COMBUSTIÓN (AIRE EN EXCESO).....	127
4.10.	CÁMARA DE COMBUSTIÓN.....	127
4.10.1.	CONSUMO DE COMBUSTIBLE.....	128
4.10.2.	VOLUMEN DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN.....	129
4.10.3.	FORMA DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN.....	130
4.10.4.	CHIMENEA.....	132
4.11.	DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR	135
CAPÍTULO 5.....		144
SELECCIÓN DE EQUIPOS Y MATERIALES NECESARIOS PARA LA INSTALACIÓN DEL HORNO		144
5.1.	VENTILADORES.....	144
5.2.	CAÍDA DE PRESIÓN EN LA PILA DE MADERA	146
5.3.	SELECCIÓN DEL QUEMADOR.....	148
5.4.	SELECCIÓN DE LOS HUMIDIFICADORES	149
5.5.	SELECCIÓN DE LAS VENTILAS.....	151
5.5.1.	Dimensionamiento de las ventilas.....	152
5.6.	DEFLECTORES	153
CAPÍTULO 6.....		154
COSTOS DE DISEÑO DEL HORNO.....		154
6.1.	ANÁLISIS DE COSTOS.....	154
6.1.1.	COSTO DE COMBUSTIBLE (LPG) PARA USO EN EL HORNO.....	154
6.1.2.	ENERGÍA ELÉCTRICA CONSUMIDA.....	155
6.1.3.	AGUA (USO INDUSTRIAL, USO HUMANO)	156
6.1.4.	ESTRUCTURA DEL HORNO	157
6.1.5.	EQUIPOS PRINCIPALES DEL HORNO	161
6.1.6.	COSTOS DE INSTALACIÓN DEL HORNO	161
CAPÍTULO 7.....		164
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		164
7.1.	COSTOS DIRECTOS	164
7.1.1.	MANO DE OBRA DIRECTA.....	164

7.1.2. CARGAS SOCIALES	165
7.2. COSTOS INDIRECTOS	165
7.3. DETERMINACIÓN DEL PUNTO DE EQUILIBRIO	166
7.3.1. COSTOS FIJOS	166
7.3.2. COSTOS VARIABLES	167
7.4. INGRESOS	168
7.5. EVALUACIÓN DEL PROYECTO	170
7.5.1. DEPRECIACIÓN	170
7.5.2. ALÍCUOTA ANUAL.....	171
7.5.4. PRESUPUESTO DE INGRESOS	174
7.5.5. VALOR ACTUAL NETO	177
7.5.6. TASA INTERNA DE RETORNO	178
7.5.7. PERÍODO DE RETORNO DE CAPITAL	179
7.5.8. RELACIÓN BENEFICIO COSTO.....	180
CAPÍTULO 8.....	182
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	182
8. 1 CONCLUSIONES	182
8. 2 RECOMENDACIONES.....	183

Figura 4. 17 Tiempo básico de secado para maderas frondosas	84
Figura 4. 18 Curva de secado que se utilizara en el horno	87
Figura 4. 19 Circuito térmico equivalente para la pared lateral compuesta del horno	88
Figura 4. 20 Esquema de flujo de aire	91
Figura 4. 21 Flujo de aire en las paredes del horno	92
Figura 4. 22 Dimensiones de un arreglo de mampostería y mortero	96
Figura 4. 23 Circuito térmico equivalente para el techo	102
Figura 4. 24 Circuito térmico equivalente para las puertas	103
Figura 4. 25 Área libre	118
Figura 4. 26 Esquema del proceso de calentamiento y secado brusco	120
Figura 4. 27 Esquema del proceso de calentamiento	121
Figura 4. 28 Esquema del proceso de secado de 80-20% CH	122
Figura 4. 29 Esquema del proceso de secado de 30-12% CH	123
Figura 4. 30 Configuración de las paredes de la cámara de combustión	130
Figura 4. 31 Esquema del quemador de Gas para el horno	131
Figura 4. 32 Cámara de combustión.....	132
Figura 4. 33 Esquema de la chimenea	135
Figura 4. 34 Gráfico de Temperatura vs longitud del intercambiador.....	136
Figura 4. 35 Arreglo de los tubos escalonados	139
Figura 5. 1 Factor de fricción y factor de correlación para un arreglo escalonado	145
Figura 5. 2 Curvas características de los ventiladores	147
Figura 5. 4 Quemador seleccionado.....	148
Figura 5. 3 Ventiladores axiales HXT/6-630/H	148
Figura 5. 5 Esquema del proceso de calentamiento	150
Figura 5. 6 Sistema de humidificación Condair Gs	151
Figura 5. 7 Tubería corta para evaporación de vapor	151
Figura 5. 8 Ventila	152
Figura 5. 9 Deflector de aluminio	153
Figura 6. 1 Arreglo de ladrillo	158
Figura 6. 2 Dimensiones del ladrillo	159
Figura 7. 1 Punto de equilibrio del proyecto	169
Figura 7. 2 Diagrama de flujos de capital	170
Figura 7. 3 Curva del índice de inflación anual.....	173

Figura 7. 4 Curva de variación del índice de precios de productos elaborados de
madera..... 176

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 3. 1 Factor de corrección para tiempo de secado relacionado con el espesor	35
Tabla 3. 2 Factor de corrección para tiempo de secado con la densidad	36
Tabla 3. 3 Factor de corrección para tiempo de secado relacionado con la temperatura de secado.....	36
Tabla 3. 4 Factor de corrección para tiempo de secado relacionado con la velocidad de secado.....	36
Tabla 3. 5 Factor de corrección para tiempo de secado relacionado con la máquina dificultad de secado.....	36
Tabla 3. 6 Factor de corrección para tiempo de secado relacionado con el agua libre (Contenido de humedad mayor a 30 %)	36
Tabla 3. 7 Consumo de energía para romper las fuerzas que ligan el agua con madera ...	40
Tabla 3. 8 Programa Fuerte (F): para maderas latifoliadas de secado fácil	41
Tabla 3. 9 Programa Moderado (M): para maderas latifoliadas de secado lento o que sean propensas a sufrir ciertas deformaciones o agrietamientos	41
Tabla 3. 10 Programa Suave (S): para maderas latifoliadas de secado difícil	41
Tabla 3. 11 Desarrollo del cuadro de 8 filas por 8 columnas	42
Tabla 3. 12 Llenado de la columna del contenido de humedad en la madera	43
Tabla 3. 13 Selección de las temperaturas de bulbo seco para cada paso	43
Tabla 3. 14 Selección de las depresiones psicométricas para cada paso.	44
Tabla 3. 15 Selección de la temperatura de bulbo húmedo	44
Tabla 3. 16 Selección de CHE% y HR% para cada paso.	45
Tabla 3. 17 Cambio de paso de temperatura de bulbo seco.	46
Tabla 3. 18 Cambio de paso de depresiones psicométricas.....	46
Tabla 3. 19 Tiempo de cada paso del programa de secado.....	48
Tabla 3. 20 Peso Específico Básico, Densidad y Programas de Secado.....	49
Tabla 3. 21 Programas Generales de Temperatura para Maderas Latifoliadas.....	50
Tabla 3. 22 Programas Generales de Temperatura para Maderas Latifoliadas.....	50
Tabla 3. 22 Humedad Relativa Ambiente y Contenido de Humedad de Equilibrio de la Madera para Diferentes	51
Tabla 4. 1 Dimensiones del tablón de madera aserrada.....	54
Tabla 4. 2 Propiedades del mortero.....	60

Tabla 4. 3 Propiedades del mampuesto	61
Tabla 4. 4 Dimensiones internas del horno	67
Tabla 4. 5 Dimensiones externas del horno	68
Tabla 4. 6 Dimensiones del techo falso	68
Tabla 4. 7 Dimensiones de las puertas del horno	68
Tabla 4. 8 Calor específico de la madera	71
Tabla 4. 9 Masa de agua a retirar	82
Tabla 4. 10 Factor de corrección para tiempo de secado relacionado con el espesor.	84
Tabla 4. 11 Factor de corrección para tiempo de secado relacionado con la densidad	85
Tabla 4. 12 Factor de corrección para tiempo de secado relacionado con la temperatura de secado.....	85
Tabla 4. 13 Factor de corrección para tiempo de secado relacionado con lavelocidad de secado.....	85
Tabla 4. 14 Factor de corrección para tiempo de secado relacionado con el agualibre	85
Tabla 4. 15 Tiempo de secado básico (hr)	86
Tabla 4. 16 Tiempo de secado corregido (hr).....	86
Tabla 4. 17 Flujo de calor por etapas	87
Tabla 4.18 Propiedades del aire a 290 K.....	91
Tabla 4. 19 Propiedades del aire a 312 K.....	94
Tabla 4. 20 Conductividad térmica de los materiales que componen la pared del horno ..	95
Tabla 4. 21 Resumen de resistencias térmicas para las paredes laterales.....	98
Tabla 4. 22 Resultados obtenidos para convección aire externo	100
Tabla 4. 23 Resultados obtenidos para convección aire externo	101
Tabla 4. 24 Resultados de resistencia térmica para las paredes de mampostería	101
Tabla 4. 25 Resultados obtenidos para convección techo	102
Tabla 4. 26 Resultados de resistencia térmica para el techo.....	103
Tabla 4. 27 Resultados obtenidos para convección aire externo	104
Tabla 4. 28 Resultados de resistencia térmica para las puertas	104
Tabla 4. 29 Calores en la etapa de calentamiento	105
Tabla 4. 30 Calor debido a las pérdidas	105
Tabla 4. 31 Calor para evaporar el agua	105
Tabla 4. 32Calor a entregar en cada etapa de secado	105
Tabla 4. 33 Entalpías de formación de cada producto de combustión	110
Tabla 4. 34 Entalpia de los gases de combustión a 2300 K	111

Tabla 4. 35	Peso molecular de los gases de combustión.	112
Tabla 4. 36	Calor específico de los gases de combustión.	114
Tabla 4. 37	Coefficiente de difusión de la teoría cinética de Shuterland.	115
Tabla 4. 38	Viscosidad dinámica de los gases de combustión a 2300 °K.....	116
Tabla 4. 39	Conductividad térmica de la mezcla de gases.	117
Tabla 4. 40	Resultados de datos obtenidos por psicrometría.	124
Tabla 4. 41	Caudal másico requerido de combustible para cada etapa.....	125
Tabla 4. 42	Cantidad de combustible neto por etapas.....	125
Tabla 4. 43	Caudal requerido de combustible para cada etapa.....	129
Tabla 4. 44	Propiedades del aire y de los gases.....	136
Tabla 4. 45	Especificaciones de la tubería a utilizar.....	138
Tabla 4. 46	Resultados de datos obtenidos en las iteraciones.....	143
Tabla 5. 1	Dimensiones del área transversal de las ventilas.	152
Tabla 6. 1	Costo de combustible.....	154
Tabla 6. 2	Costos de servicios básicos.....	156
Tabla 6. 3	Volumen y masa de mortero.....	157
Tabla 6. 4	Volumen y masa de mortero ideal a utilizar.....	158
Tabla 6. 5	Volumen de mortero neto debido a la obra civil.....	159
Tabla 6. 6	Cantidad total de ladrillos a usar.....	159
Tabla 6. 7	Volumen de hormigón a usar en el techo.....	160
Tabla 6. 8	Costos concepto obras de Ingeniería Civil.....	160
Tabla 6. 9	Costos del equipo básico.....	161
Tabla 6. 10	Costos del equipo auxiliar.....	161
Tabla 6. 11	Costos de instalación las puertas del horno.....	162
Tabla 6. 12	Costos de instalación del cielo falso.....	162
Tabla 6. 13	Costos de instalación del intercambiador de calor.....	163
Tabla 6. 14	Costos de instalación de la cámara de combustión.....	163
Tabla 7. 1	Costos concepto salarios.....	164
Tabla 7. 2	Cargas sociales del proyecto.....	165
Tabla 7. 3	Costos de útiles de aseo y seguridad.....	165
Tabla 7. 4	Costos anuales debido a servicio de comunicación.....	166
Tabla 7. 5	Valores de ingreso ecuación de costos.....	168
Tabla 7. 6	Valores de la ecuación de ingresos.....	168

Tabla 7. 7 Desglose de la depreciación del proyecto	171
Tabla 7. 8 Datos de índice de inflación	173
Tabla 7. 9 Proyección de los costos del proyecto.....	174
Tabla 7. 10 Índice de incremento de precios de productos de madera	175
Tabla 7. 11 Proyección de los ingresos del proyecto	176
Tabla 7. 12 Flujo de operación del proyecto.....	177
Tabla 7. 13 Valor actual neto del flujo neto.....	178
Tabla 7. 14 Tasa interna de retorno.....	179

RESUMEN

El presente proyecto tiene como finalidad el diseño térmico de un horno para secado de madera con una capacidad de 23 metros cúbicos al mes, para alcanzar los objetivos establecidos se presenta el proyecto desarrollado en 7 capítulos.

Primero se tratarán los métodos más empleados para el proceso de secar madera y de los equipos que se utilizan en cada sistema de secado, las ventajas y desventajas, luego se analizarán todos los parámetros que intervienen en el proceso de secado de madera al horno. Además se estudiara otros parámetros como el aire húmedo con sus diferentes propiedades, humedad relativa, velocidad, temperatura de bulbo seco y húmedo, etc.

Después se estudiarán todas las etapas y características que se tienen en el proceso de secado de madera desde el calentamiento hasta el enfriamiento, posteriormente se tratará las características técnicas y parámetros que son necesarias para el diseño del horno de secado de madera, se mencionará cada parte de la cámara de secado, definiendo las dimensiones, materiales, y otros aspectos, además se desarrolla el cálculo térmico del horno, seguidamente se seleccionarán los equipos, instrumentación y accesorios necesarios para el funcionamiento del horno, tales como ventiladores, humidificadores, quemadores, etc., después se analizara la inversión a realizar para la adquisición de todos los elementos, materiales equipos, que se involucran durante la construcción e instalación del horno para su normal funcionamiento, los costos serán analizados para un año de funcionamiento del horno, a posterior se analizará la rentabilidad financiera del proyecto, mediante el estudio de los indicadores financieros tales como TIR, VAN, etc., permitiendo su ejecución y operación en condiciones de éxito.

PRESENTACIÓN

La madera y sus productos derivados se han usado como materia prima desde algunos años y va creciendo su demanda, debido a que la madera es obtenida del corte de los árboles tienen un alto contenido de humedad el cual debe ser retirado para su posterior uso en la industria.

El secado de la madera es el proceso más importante para que la madera esté en buen estado, por lo que se ha visto la necesidad de aportar con los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera, para el diseño de un horno de secado.

El diseño desarrollado se basa tanto en fundamentos teóricos como en experiencias y recomendaciones, lo que permite obtener un diseño que da como resultado el contenido de humedad final deseado en la madera en un tiempo mucho menor que el secado al aire libre.

CAPÍTULO 1

MÉTODOS DE SECADO DE MADERA

Este capítulo trata de los métodos más empleados para el proceso de secar madera y de los equipos que se utilizan en cada sistema de secado, las ventajas y desventajas

1.1. SECADO NATURAL AL AIRE

1.1.1. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

El secado de madera al ambiente consiste en apilar la madera al aire libre con un espaciado adecuado entre tablones que permita el paso del aire. La pila de madera tiene que estar en un lugar plano y dispuesto de tal modo que la pila quede en su sentido longitudinal, transversalmente a la dirección del viento principal. La pila de madera debe tener el tamaño adecuado para que esta pueda removerse o acarrear sin dificultad.¹

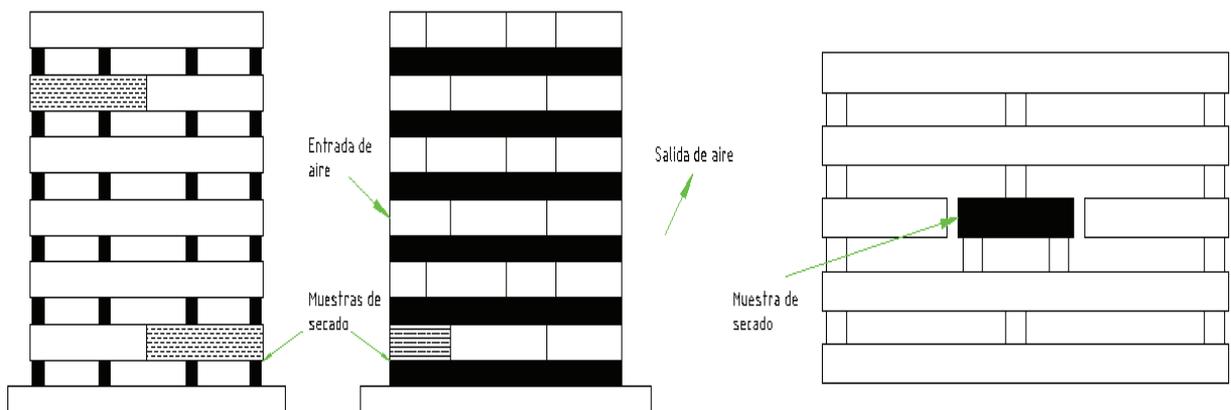


Figura 1. 1 Pila de madera

¹CIURLO, F. 2006. Conceptos básicos del secado de la madera, pág. 104

Cada clase de madera debe tener una pila determinada, por lo cual las clases de madera que secan lentamente, o sea que permanecen más tiempo en el lugar se apilan aparte. El lugar debe estar exento de tierra vegetal y cubierto de arena gruesa, grava o adoquinado para evitar la absorción de la humedad de la tierra hacia la madera. (Con frecuencia el piso del secador también es de hormigón).

Los desperdicios de madera y los trozos podridos hay que alejarlos por el posible ataque de hongos. Este tipo de proceso puede llegar a durar de 5 a 7 meses, para llegar a una humedad del 30% y depende de la clase de madera y por supuesto de su espesor.

Para que la madera sea usada para muebles o para otros productos terminados que requieren un contenido de humedad de 6–8%, solo el secado al aire no puede hacer todo ese trabajo. A menudo es utilizado como un primer paso, para después colocar la madera en un horno para el secado final.²

1.1.2. VENTAJAS DEL SECADO NATURAL

- Este método tiene un bajo costo de inversión.
- Tiene un bajo costo operación.
- No se necesita mano de obra especializada para el manejo del proceso.

1.1.3. DESVENTAJAS DEL SECADO NATURAL

- El largo tiempo de secado que se necesita.
- Los defectos en la madera como torceduras agrietamientos.
- La influencia negativa de las estaciones.
- El ataque de insectos y principalmente las pérdidas por degradación.
- Costos asociados al uso de la tierra.
- Es a menudo la manera más cara de secar una vez que se incluye el interés en el dinero detenido.

²NYLE SYSTEMS. Introducción del secado al horno, pág. 7.

1.2. SECADO ARTIFICIAL DE LA MADERA

El secado en cámaras u hornos ofrece grandes ventajas, como son el reducir el tiempo de secado a unos pocos días e incluso horas y determinar exactamente el grado de humedad de la madera, con lo cual se mejora su calidad y hay menos desperdicio.

El secado artificial de la madera tiene lugar en instalaciones, que por lo general son cámaras completamente metálicas, de acero o de aluminio, con paredes y techos con protección calorífica (lana mineral) por su bajo coeficiente de transmisión térmica. Los secadores, que varían en tamaño y forma, llevan instalaciones o equipos con ayuda de los cuales gradúan o regulan la humedad, temperatura y circulación del aire de tal modo que el ambiente resulte óptimo para el secado de la madera.



Figura 1. 2Secado artificial³

Estos equipos industriales son en esencia: instalación de calefacción, tubería de aspersión, motor con ventilador axial o centrífugo, válvulas de entrada de aire del exterior y salida, cubierta intermedia con arco desviador, equipos de medida y control para la regulación y vigilancia del proceso de secado.

³CIURLO, F. 2006. Conceptos básicos del secado de la madera, pág. 101.

Con ayuda del dispositivo de aspersión se puede rociar la cámara con vapor de agua y con la de calefacción calentar su aire. Ambos equipos permiten alcanzar la humedad relativa del aire necesaria en cada caso para el proceso de secado.

Mediante el ventilador de aspas, el cual se encuentra en la cámara, se genera una corriente de aire que circula a través de la pila de madera. Con los equipos de entrada y salida de aire puede expulsarse la humedad donde el aire se encuentra saturado de vapor de agua y para hacer entrar aire fresco no saturado. Durante el proceso de secado se condensa agua preferentemente en las paredes del secador, que se desagua a través de una abertura especial. El secado depende de la clase de madera, del espesor de la misma, de la humedad inicial y de la humedad final que se desee. Las maderas duras son más difíciles de secar y precisan más tiempo que las blandas. La madera con un contenido inicial de humedad elevado han de estar más tiempo en el secador en comparación con la que tiene un secado previo. El secado perfecto, solamente se alcanza siguiendo un plan determinado mediante tablas. Los secadores modernos trabajan de modo semiautomático o del todo automático, que simplifica el proceso y con el que se consiguen resultados seguros.⁴

Según el plan de secado, la madera pasa por cinco fases: el calentamiento del aire del secadero, el calentamiento de la madera que se encuentra en el secador, el proceso de desecación apropiado mediante la aplicación de aire de entrada caliente y aspersión de vapor o humectación, el acondicionamiento, o sea la fijación de la humedad final, y el enfriamiento lento.⁵

Los sistemas más usados de secado artificial son: convección, condensación, solar, radio frecuencia, y al vacío, cada tipo de secador tiene sus ventajas y

⁴CIURLO, F. 2006. Conceptos básicos del secado de la madera, pág. 104, 105.

⁵CIURLO, F. 2006. Conceptos básicos del secado de la madera, pág. 106.

desventajas y la utilización de estos depende de las necesidades de cada empresa.

1.2.1. SECADORES DE CONVECCIÓN

1.2.1.1. Principio de funcionamiento

El sistema de convección en la actualidad es uno de los más utilizados en gran parte de la industria maderera, en este tipo de sistema se intercambia el aire saturado de agua con aire fresco, por lo cual los secadores que utilizan este sistema tienen salidas para el aire húmedo y entradas para el aire seco, este tipo de secadores trabajan a temperaturas elevadas normalmente de 60 a 90 °C, en este tipo de sistema se pueden usar quemadores a diesel o de gas para la generación de energía calorífica, también se emplea la quema de desperdicios de madera siendo esta una de la forma más económica.⁶ En la figura 1.3 se muestra un esquema de este sistema.

1.2.1.2. Ventajas de los secadores de convección.

- Este tipo de sistema no utiliza equipos con tecnología avanzada.
- Este secador puede dar una calidad muy buena de madera si son proporcionados con un método de control bueno.
- Tiene un bajo costo operación.

1.2.1.3. Desventajas de los secadores de convección.

- Este proceso consume mucho calor ya que requiere un constante calentamiento de aire.
- Estos sistemas no son tan eficientes en el consumo de energía.

⁶CIURLO, F. 2006. Conceptos básicos del secado de la madera, pág. 106, 107.

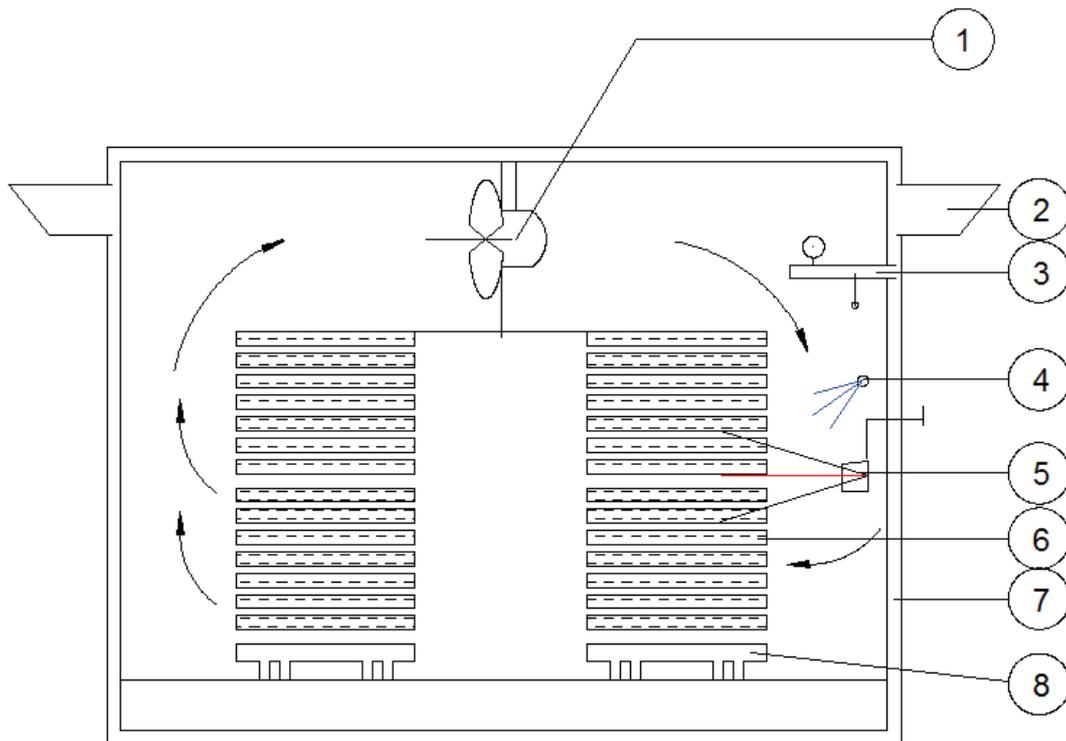


Figura 1. 3Secador por convección

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

1.2.2. SISTEMA DE CONDENSACIÓN.

1.2.2.1. Principio de funcionamiento

La base de este sistema es un equipo de refrigeración de aire o conocido también como bomba de calor, el proceso consiste en que el aire que circula por las pilas de madera absorbe humedad contenida en la madera por lo cual el aire reduce su capacidad de absorción de agua y con este equipo el exceso de agua evaporada empieza a condensarse y sale en forma líquida hacia el exterior de la cámara de secado, de esta manera se mantiene la capacidad de absorción del aire que recircula dentro de la cámara ya que sin este fenómeno el aire se saturaría con el agua contenida en la madera.

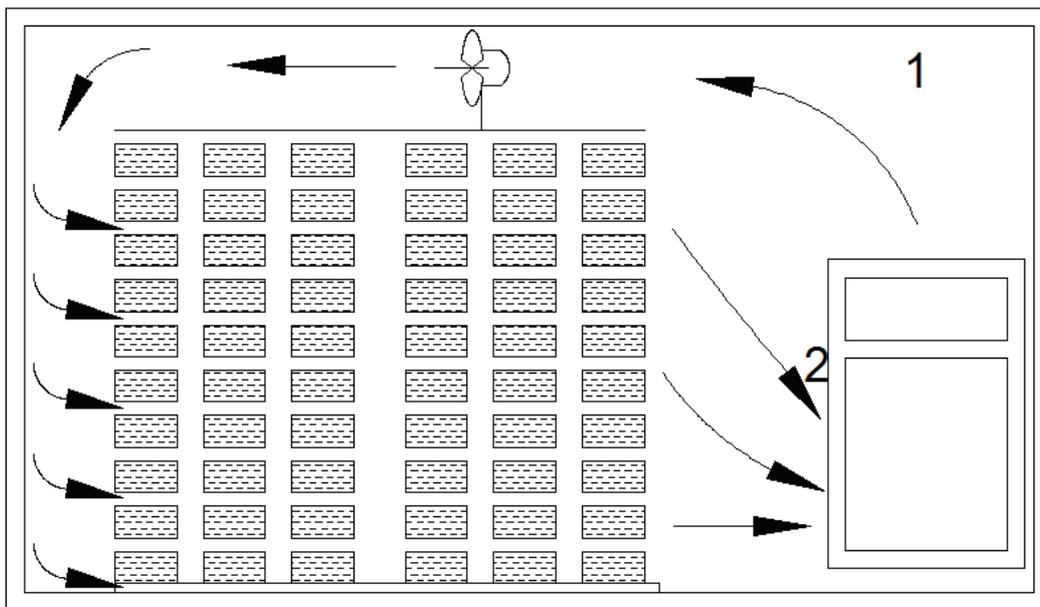


Figura 1. 4 Sistema de condensación

La razón por la que un sistema de des-humidificación cuesta menos de operar, aunque el sistema de convección queme combustibles menos caros, reside en la capacidad del sistema de des-humidificación de conservar energía por reciclar calor. Siendo el calor constantemente reciclado, es decir en un horno de des-humidificación, el aire calentado, (usualmente comenzando con un calor de acerca de 85°F o 29° C) es circulado sobre la madera con ventiladores separados de

circulación, evaporando el agua contenida en la madera. Entonces el aire caliente y húmedo pasa sobre una serpentina de refrigeración donde es enfriada a acerca de 60°F (15° C). En la serpentina de refrigeración, el vapor de agua se condensa en forma de líquido que se drena fuera como una corriente de agua fría en vez de salir expurgada como una nube de vapor transportado por aire caliente, como en un horno convencional.

Cuando el aire es enfriado en la serpentina de refrigeración, inmediatamente el calor extraído es utilizado de nuevo por el sistema para calentar el aire otra vez. La eficiencia del uso de energía por regreso del calor es tanta que cada vez que este proceso ocurre, el aire sale del deshumidificador a una temperatura aún más caliente que cuando entró. La temperatura del aire puede alcanzar temperaturas tan altas como 160°F (72° C).⁷

1.2.2.2. Ventajas del sistema de condensación.

- Es más eficiente en el uso de energía y su costo de operación es generalmente más bajo.
- No consume ningún tipo de combustible.
- Utiliza eficazmente el calor disponible.
- Se necesita de poco equipo para su funcionamiento.
- Inversión inicial y costos de mantenimiento menores.

1.2.2.3. Desventajas del sistema de condensación.

- El secado se realiza lentamente en algunos meses.
- El contenido de humedad de la madera solo se lo puede bajar hasta un aproximado de 14%
- Tiene un alto consumo de energía eléctrica.

⁷NYLE SYSTEMS. Introducción del secado al horno, pág. 10.

1.2.3. SECADORES DE ENERGÍA SOLAR

1.2.3.1. Principio de funcionamiento

Aprovecha la energía calorífica del sol y la luz para ganar temperatura, estas funcionan también controlando la temperatura y la humedad y empleando ventiladores para forzar las corrientes de aire tal como sucede con los sistemas de convección.⁸

El tiempo de secado en los hornos solares depende del clima, por consiguiente es imprevisible. En climas calientes pueden degradar la madera debido al secado excesivo. En climas más fríos son lentos e inconstantes. Los hornos solares a menudo utilizan ventiladores que requieren electricidad para hacer circular aire por la madera, pero los costos de operar estos ventiladores son altos por causa del largo tiempo que se tienen que hacer funcionar los ventiladores, haciendo que el secado solar resulte bastante caro. La electricidad que se usa para operar los ventiladores en un horno solares generalmente más de lo que se usaría operando un secador por convección pues el tiempo de secado es mucho más largo.⁹

1.2.3.2. Ventajas de los secadores de energía solar.

- La principal ventaja de este sistema es que no consume ningún tipo de combustible.
- Este sistema tiene mucho respeto por el medio ambiente.
- Este tipo de secador constituye una alternativa ecológica.

1.2.3.3. Desventajas de los secadores de energía solar.

- El costo de este tipo de secador supera a cualquiera de los otros sistemas de secado debido al alto costo de los paneles solares.
- Este proceso de secado se desarrolla más lentamente que usando secadores convencionales o deshumidificadores.

⁸ CIURLO, F. 2006. Conceptos básicos del secado de la madera, pág. 106.

⁹ NYLE SYSTEMS. Introducción del secado al horno, pág. 9.

- El tiempo de secado en este horno depende del clima lo cual lo hace imprevisible.



Figura 1. 5Secador por energía solar¹⁰

1.2.4. SECADORES AL VACÍO

1.2.4.1. Principio de funcionamiento

El secado al vacío es una alternativa para pequeñas industrias ya que el consumo de madera en estas es bajo.

Este tipo de secador es generalmente de forma tubular de acero que contiene un cierre hermético para permitir la generación de un vacío en su interior.

En este sistema al bajar la presión atmosférica se reduce la temperatura de ebullición del agua y también se reduce la resistencia del agua al pasar por la madera, esto acelera el proceso de secado del agua en la madera.

La calefacción de la madera a secar se la realiza mediante planchas de aluminio con calentamiento mediante agua o vapor, existe un caso en el cual se utiliza aire caliente para calentar la madera en este caso el proceso de secado al vacío se lo realiza de forma cíclica.

¹⁰CIURLO, F. 2006. Conceptos básicos del secado de la madera, pág. 105.

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

En el interior de la madera se encuentra en este momento mayor temperatura que en la superficie lo que causa que la humedad fluya igualmente con el calor hacia la superficie, evaporándose allí con mayor facilidad por la reducida presión atmosférica, este proceso se repite continuamente hasta lograr la humedad deseada en la madera.¹¹



Figura 1. 6Secador al vacío¹²

¹¹NYLE SYSTEMS. Introducción del secado al horno, pág. 10.

¹²CIURLO, F. 2006. Conceptos básicos del secado de la madera, pág. 105.

1.2.4.2. Ventajas de los secadores al vacío.

- Este proceso de secado se realiza de 4 a 5 veces más rápido que en los secadores convencionales.
- Existe una mejor calidad de secado.

1.2.4.3. Desventajas de los secadores al vacío.

- El costo de adquisición de estos equipos es muy alto en comparación al resto de los sistemas.
- Este sistema solo sirve para pequeñas industrias.

1.2.5. SECADORES POR RADIO FRECUENCIA

1.2.5.1. Principio de funcionamiento.

Este sistema también se utiliza para cargas pequeñas de madera, esta opera con el principio de radio frecuencia, es decir es similar al funcionamiento de un horno de microondas.

Las células con agua son obligadas a vibrar con alta frecuencia, para generar un calentamiento de las células.¹³

El calentamiento de una masa inducido por microondas es debido a la agitación molecular que sufren los dipolos que son las moléculas de agua al estar expuestas a un campo alterno de ondas de alta frecuencia, por lo que en un horno a microondas, cualquier material húmedo se calienta rápidamente y uniformemente en toda su masa, y las superficies expuestas pierden agua por evaporación y se enfrían. La distribución de temperaturas es típica, las temperaturas más altas se producen en el interior del material y las más bajas en las superficies expuestas. Esta distribución de temperaturas es justamente contraria a la producida por un secado por convección.¹⁴

¹³CIURLO, F. 2006. Conceptos básicos del secado de la madera, pág. 105.

¹⁴<http://secadodemadera.blogspot.com/>.

1.2.5.2. Ventajas de los secadores por radio frecuencia.

- Con este sistema se puede obtener tiempos de secado verdaderamente rápidos.
- Existe una mejor calidad de secado.

1.2.5.3. Desventajas de los secadores por radio frecuencia.

- El consumo de energía es considerable.
- Los equipos para este sistema tienen un alto costo.
- Se puede secar solo cantidades pequeñas de madera

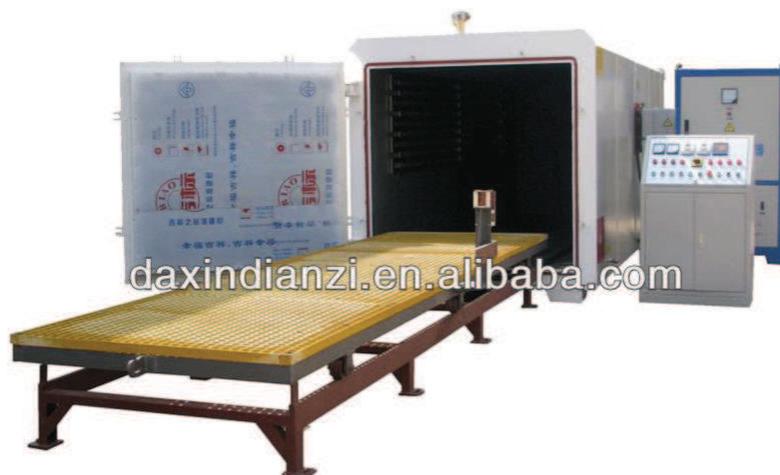


Figura 1. 7Secador por radio frecuencia¹⁵

¹⁵<http://spanish.alibaba.com/product-gs/rf-radio-frequency-wood-drying-equipment-697183902.html>

CAPÍTULO 2

ESTUDIO DE LOS PARAMETROS INVOLUCRADOS DURANTE EL SECADO DE MADERA

En este capítulo se tratarán todos los parámetros que intervienen en el proceso de secado de madera al horno. Además se estudiarán otros parámetros como el aire húmedo con sus diferentes propiedades, humedad relativa, velocidad, temperatura de bulbo seco y húmedo, etc.

2.1. AIRE HÚMEDO

El aire que está presente en el ambiente es una mezcla de aire seco y vapor de agua. A esta mezcla se le conoce como aire atmosférico, el aire seco a la vez es una mezcla de nitrógeno, oxígeno y pequeñas cantidades de otros gases, la composición del aire seco permanece casi constante pero el contenido de vapor de agua varía por diferentes factores como la condensación, evaporación de lagos, etc. La cantidad de vapor que se encuentra en el aire es pequeña y juega un papel importante en las propiedades del aire atmosférico.

2.1.1. TEMPERATURA DE BULBO SECO

La temperatura de bulbo seco es la temperatura que marca un termómetro convencional en donde el bulbo se mantiene seco.



Figura 2. 1 Termómetro¹⁶

2.1.2. TEMPERATURA DE BULBO HUMEDO

Temperatura que marca un termómetro cuyo bulbo este recubierto de una mecha de algodón humedecido con agua, y además sobre el algodón debe haber un flujo de aire.

¹⁶ <http://www.experimentosfaciles.com>

El conjunto del termómetro seco y húmedo se conoce como psicrómetro, las mediciones realizadas en los termómetros permiten obtener la humedad relativa del aire de tablas.

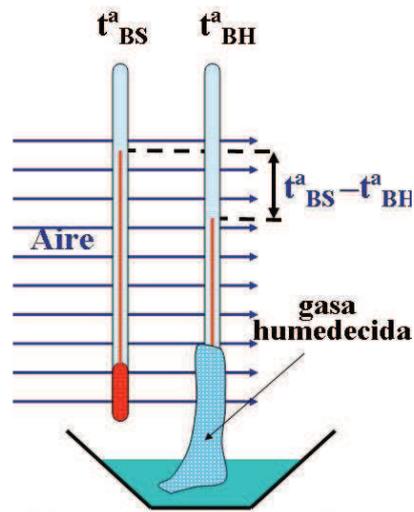


Figura 2. 2 Psicrómetro normal¹⁷

2.1.3. HUMEDAD ESPECÍFICA DEL AIRE

El aire atmosférico es una mezcla de aire seco y vapor de agua, si se tiene una determinada masa de aire atmosférico entonces, la humedad específica del aire es la relación que existe entre la masa de vapor de agua y la masa de aire seco que contiene la masa de aire atmosférico, también se le conoce como relación de humedad (ω).

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} \quad \text{Ec. (2. 1)}$$

Dónde:

ω : Humedad específica (Kg vapor de agua)/(Kg aire)

m_v : Masa de vapor de agua (Kg)

m_a : Masa aire seco (Kg)

¹⁷ http://ocw.upm.es/produccion-animal/produccion-avicola/contenidos/TEMA_3/3-2-condiciones-ambientales-ta-y-hr/view

Cuando el aire no contiene vapor de agua se le conoce como aire seco y su humedad específica es cero, si la cantidad de vapor aumenta la humedad específica aumentará hasta que el aire no pueda contener más humedad en este punto se dice que el aire está saturado de humedad.¹⁸

2.1.4. HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE

Se conoce que a una determinada temperatura el aire ambiente contiene una determinada cantidad de vapor de agua, pero a estas condiciones también se puede seguir agregando vapor de agua hasta que el aire se sature. La humedad relativa del aire es la cantidad de vapor de agua que contiene respecto a la cantidad máxima de vapor de agua que puede contener a la misma temperatura.

$$\phi = \frac{m_v}{m_g} \quad \text{Ec. (2. 2)}$$

Dónde:

ϕ : Humedad relativa (%)

m_v : Masa de vapor de agua que contiene una cantidad de aire seco (Kg)

m_g : Masa de vapor de agua máxima que puede contener una cantidad de aire seco (Kg)

2.1.5. VELOCIDAD DEL AIRE¹⁹

El aire caliente debe circular a través de la pila de madera a una velocidad que garantice el secado. El aire va a ser movido mediante ventiladores. La velocidad del aire que atraviesa la pila deberá tener un valor mínimo entre 1.5 a 2.5 m/seg.

¹⁸Y. CENGEL, M. BOLES, (2002); *Termodinámica*. México-México DF, McGraw-Hill, Pág.733

¹⁹ NOBOA, L. (2006). Manual de buenas prácticas de manufactura para el secado de madera aserrada. Pág.

2.1.6. CARTA PSICROMÉTRICA

Al conocer dos propiedades intensivas de aire se pueden determinar el resto de las propiedades, sin embargo esto implica un gran número de cálculos extensos. Con el objetivo de facilitar la determinación de las propiedades del aire existen gráficas con estas propiedades que son fáciles de leer, en la **Fig. 2.3** se presenta una carta psicrométrica.

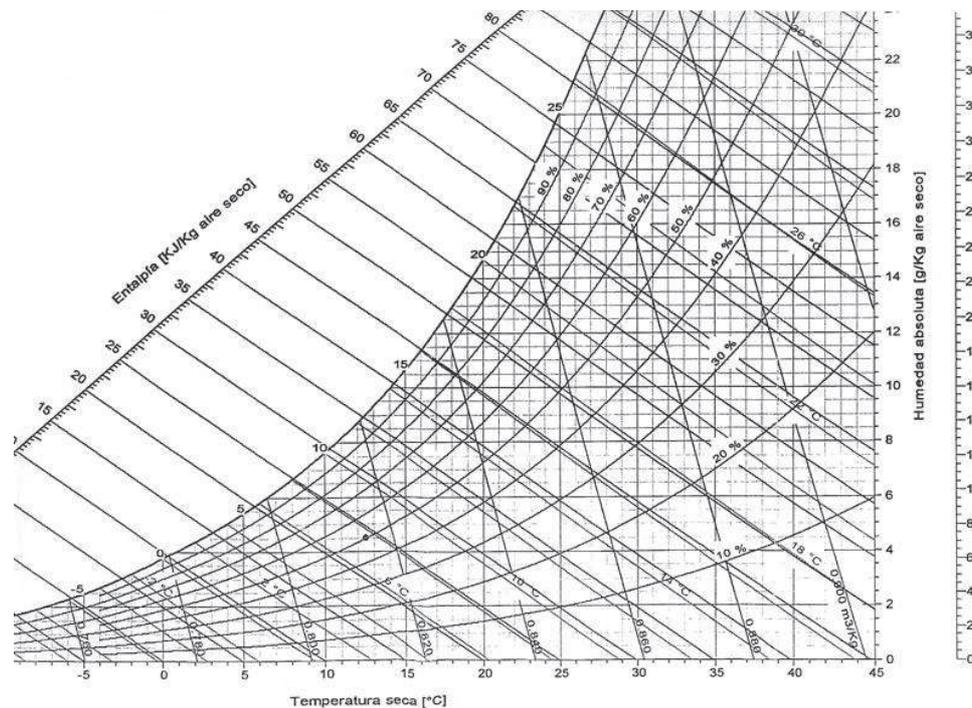


Figura 2. 3 Esquema de la carta psicrométrica.²⁰

2.2. HUMEDAD EN LA MADERA²¹

La humedad es un factor muy importante en lo que tiene que ver con los diferentes usos que puede tener la madera, de este factor dependen muchas de las propiedades físicas y mecánicas, de su estabilidad dimensional al momento que la

²⁰http://www.ficlaho.com/ficfog_instalacion.php

²¹ORBE, L. (1989). "Contenido de humedad de equilibrio de la madera en varias localidades del Ecuador, Quito, Ecuador, Pág. 2

madera adquiere una forma definida, así como también la resistencia que presenta la misma a ataques de hongos e insectos.

La madera es un material higroscópico, esto debido a que tiende a disminuir de volumen cuando pierde humedad y a aumentar de volumen cuando absorbe humedad. Por tanto se define material higroscópico al material que presenta la tendencia de eliminar o absorber humedad con facilidad.

2.2.1. CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA MADERA Y SU DETERMINACIÓN

El contenido de humedad en una pieza de madera se define como la relación que existe entre la masa de agua que contiene y su masa una vez que este ha sido secado o anhidro, expresado en porcentaje. Para obtener la masa de agua que contiene la madera es necesario verificar la masa antes del secado y después del mismo.

Para su cálculo se utiliza la siguiente fórmula:

$$C.H = \frac{P.V - P.S}{P.S} * 100 \quad \text{Ec. (2. 3)}$$

Dónde:

C.H: Contenido de humedad de la madera (%)

P.V: Peso de la madera en estado verde o inicial (*Kg*)

P.S : Peso de madera seca al horno o anhidro (*Kg*)

2.2.2. EL AGUA EN LA MADERA²²

Como la madera es un material higroscópico este siempre va a absorber humedad del ambiente y en consecuencia va a tener presencia de agua en su estructura lo que se conoce como humedad en la madera, la madera presenta dos tipos de agua en su estructura, el agua libre y el agua ligada o de impregnación.

²²ORBE, L. (1989). "Contenido de humedad de equilibrio de la madera en varias localidades del Ecuador, Quito, Ecuador, Pág. 2

2.2.2.1. Agua libre

Es el agua que se presenta en la estructura de la madera, esta se encuentra dentro de las cavidades celulares y se mueve sin dificultad de una célula a otra.

La única función de este tipo de agua es la de ocupar un espacio físico, es decir en los espacios intercelulares, no tiene ningún tipo de unión con la pared celular, por lo tanto no influye en la hinchazón o encogimiento de la madera ni en sus propiedades mecánicas. El agua libre una vez eliminada por la madera no puede ser recuperada a partir de la humedad que se encuentra en el ambiente, y para recuperarla tendrá que ser sumergida en agua. Se considera agua libre a la que supera el 30 % de humedad.

El agua libre al no presentar ninguna unión con las paredes celulares y por su facilidad de moverse sin dificultad de una célula a otra puede ser eliminada fácilmente.

2.2.2.2. Agua ligada²³

Es aquella que se encuentra retenida en las paredes celulares por fuerzas de adsorción y capilaridad hasta su saturación, las moléculas de agua están ligadas a la pared celular de la madera mediante enlaces químicos. La pérdida o ganancia de esta agua está ligado directamente con la propiedad higroscópica de la madera, es decir que la madera puede recuperar el agua ligada solo por estar sometida al aire húmedo. El agua ligada es la causante de los fenómenos de hinchazón y encogimiento de la madera, lo que ocurre entre el 0 % y aproximadamente el 30 % de contenido de humedad dependiendo de la especie de madera.

Al hablar del 0% de humedad es un estado falso de un secado completo, debido a que el agua siempre va a estar presente en la estructura de la madera, pero se toma al estado anhídrido como referencia y por debajo de este punto el agua es imposible de eliminar por secado, solo la combustión de la madera es capaz de

²³ NOBOA, L. (2006). *Manual de buenas prácticas de manufactura para el secado de madera aserrada*. Pág. 13

eliminar el agua de constitución. En comparación con el contenido neto de agua en la madera el agua de constitución representa una insignificante parte.

2.2.3. HUMEDAD DE LA MADERA EN ESTADO VERDE²⁴

El estado verde en la madera corresponde a troncos de árboles recién cortados, la humedad que contiene proviene de la sabia del árbol que ha sido acumulada durante el crecimiento del mismo. En estado verde la madera contiene tanto el agua libre y el agua ligada, una vez que la madera ha sido cortado este pierde rápidamente el agua que tiene en la superficie hasta alcanzar un equilibrio con el medio ambiente al que está expuesto.

En una madera en estado verde el contenido de humedad puede variar desde aproximadamente el 35 % a más del 200 % dependiendo de la especie de árbol.

2.2.4. PUNTO DE SATURACIÓN DE LAS FIBRAS²⁵

Las células de la madera se encuentran compuestas por cavidades y paredes. El agua que llena las cavidades celulares se la conoce como agua libre, por salir fácilmente a la superficie; en contraste con el agua higroscópica cuya salida es más dificultosa debido a los enlaces con las paredes celulares. Con el aumento del agua libre se llenan los espacios vacíos de la estructura porosa de la madera por lo que solo afecta a la madera en cuanto a su peso.

Durante el proceso de secado primero se elimina el agua libre, la cual es más fácil de eliminar dejando las cavidades libres, quedando únicamente la que satura las paredes o ligada, entonces se dice haber llegado al punto de saturación de las fibras. Este punto ocurre cuando el contenido de humedad es alrededor del 30 % y es prácticamente igual en todas las especies.

²⁴ORBE, L. (1989). "Contenido de humedad de equilibrio de la madera en varias localidades del Ecuador", Quito ,Ecuador, Pág. 4

²⁵ORBE, L. (1989). "Contenido de humedad de equilibrio de la madera en varias localidades del Ecuador" ,Quito ,Ecuador, Pág. 4

El punto de saturación de las fibras también se lo puede definir como el contenido de humedad en la madera que se encuentra en equilibrio en un ambiente con el 100 % de humedad relativa.

Este punto es determinante ya que marca un límite en el comportamiento de la madera, tanto en sus propiedades físicas como mecánicas. Por encima de este punto las propiedades prácticamente no varían; pero por debajo, todas ellas se ven afectadas en menor o mayor grado.

2.2.5. CONTENIDO DE HUMEDAD DE EQUILIBRIO DE LA MADERA²⁶

El contenido de humedad de equilibrio de la madera es el contenido de humedad que alcanzaría la madera si se la deja indefinidamente bajo condiciones de temperatura y humedad relativa constantes.

Si la madera se encuentra completamente seca y se la deja expuesta a un ambiente con temperatura y humedad relativa determinadas, las moléculas de agua o partículas de agua empiezan a penetrar por los espacios existentes en su estructura y quedan retenidas; este proceso continúa hasta que se produce un estado de equilibrio entre las partículas de agua que entran y salen de la madera.

Si se mantiene constante la temperatura y varía la humedad relativa del aire, se obtendrá una serie de valores de humedad de la madera que corresponderán a los diferentes equilibrios que se van presentando según los valores cambiantes de humedad relativa. El poder higroscópico de la madera disminuye con el incremento de la temperatura.

2.2.6. DENSIDAD DE LA MADERA²⁷

La densidad de la madera se define como la masa por unidad de volumen con respecto a un determinado contenido de humedad y se expresa mediante la siguiente fórmula:

²⁶ NOBOA, L. (2006). *Manual de buenas prácticas de manufactura para el secado de madera aserrada*. Pág. 11

²⁷ GRUPO ANDINO. (1989). *Manual del grupo andino para el secado de maderas*, Lima, Perú, Carvajal, pág. 19,20.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{Ec. (2. 4)}$$

Dónde:

ρ : Densidad (gr/cm^3)

m : Masa de una pieza de madera a un determinado contenido de humedad (Kg)

V : Volumen de la misma pieza a igual contenido de humedad (cm^3)

Un aumento en el contenido de humedad en la madera trae como consecuencia un aumento en su masa, esto se da en mayor proporción que en el cambio en el volumen, en consecuencia se tendrá un aumento en su densidad.

Por encima del punto de saturación de las fibras, la tasa de incremento en su densidad será mayor debido a que por encima de este punto los cambios en volumen son casi imperceptibles y se detiene el fenómeno de hinchazón.

Se debe tener en cuenta que tanto la masa como el volumen varían significativamente de acuerdo al contenido de humedad de la madera, es importante enunciar bajo qué condiciones de humedad se obtiene la densidad. Para efectos de comparación de la densidad entre especies, se han normalizado los siguientes valores:

$$DA = \frac{m_o}{V_o} \quad \text{Ec. (2. 5)}$$

$$DN = \frac{m_{12\%}}{V_{12\%}} \quad \text{Ec. (2. 6)}$$

$$DF = \frac{mf}{Vf} \quad \text{Ec. (2. 7)}$$

Dónde:

DA : Densidad anhidra (Kg/m^3)

DN : Densidad normal (Kg/m^3)

DF : Densidad en el punto de saturación de las fibras (Kg/m^3)

m_o : Masa seca al horno (Kg)

V_o : Volumen seco al horno (m^3)

$m_{12\%}$: Masa al 12% de contenido de humedad (Kg)

$V_{12\%}$: Volumen al 12% de contenido de humedad (m^3)

m_f : Masa en el punto de saturación de las fibras (Kg)

V_f : Volumen en el punto de saturación de las fibras (m^3)

2.3. ANISOTROPÍA DE LA HINCHAZÓN Y CONTRACCIÓN²⁸

Cuando la madera se somete a un proceso de secado, el agua que va perdiendo va dejando espacios libres en su estructura interna por lo tanto empieza a contraerse en las tres direcciones. Al igual si la madera empieza absorber agua va a empezar un proceso de hinchazón en las tres dimensiones.

La anisotropía trae como consecuencia diferentes valores de hinchazón o contracción en las tres direcciones u orientaciones de la madera.

La contracción longitudinal de madera normal (βl) desde la condición de verde a seca en horno, fluctúa entre 0.1% y 0.9% y esta puede ser mucho más alta en madera juvenil, madera de compresión o madera de tensión. Se ha encontrado además que para una misma especie la contracción longitudinal varia inversamente con la densidad por lo que se concluye que aquellas piezas de madera con densidad anormal o menor, se contraen más a lo largo del grano que las piezas más pesadas de la misma especie. En coníferas de rápido crecimiento la contracción longitudinal es excesiva.

²⁸GRUPO ANDINO. (1989). "Manual del grupo andino para el secado de maderas", Lima, Perú, Carvajal,, pág. 29,30

En la dirección tangencial, los límites de la contracción (β_t) para el secamiento desde la condición de verde a seca al horno, son de 3.5 % a 15% de la dimensión en verde. Los valores comparables de contracción radial (β_r), son 2.4% a 11%.

2.3.1. CÁLCULO DE HINCHAZÓN Y CONTRACCIÓN ²⁹

La hinchazón lineal de una pieza de madera cuando su contenido de humedad varía de seco al horno al punto de saturación de las fibras, se calcula con la siguiente fórmula:

$$\alpha = \frac{d_f - d_o}{d_o} * 100 \quad \text{Ec. (2. 8)}$$

Dónde:

α : Hinchazón longitudinal, tangencial o radial, respecto de la dimensión seca al horno. (%)

d_f : Dimensión longitudinal, tangencial o radial de la pieza de madera a un contenido de humedad igual al 30 %. (mm)

d_o : Dimensión longitudinal, tangencial o radial de la misma pieza en condición seca al horno (CH=0%). (mm)

De la misma manera, el cálculo de la contracción entre el punto de saturación de las fibras y la condición de seca al horno, se calcula de la siguiente manera:

$$\beta = \frac{d_f - d_o}{d_f} * 100 \quad \text{Ec. (2. 9)}$$

Dónde:

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

²⁹GRUPO ANDINO. (1989). "Manual del grupo andino para el secado de maderas", Lima, Perú, Carvajal,, pág. 30,31,32

2.3.1.1.Efectos de la Anisotropía Durante el Secado de la Madera

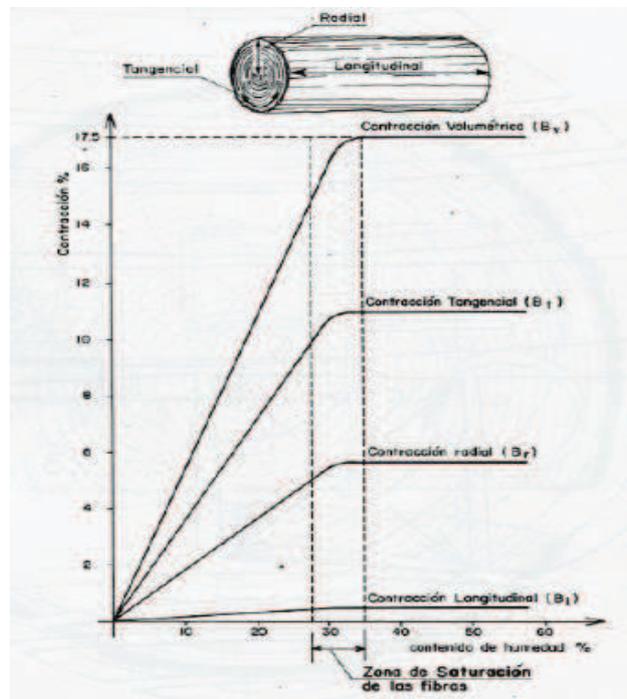


Figura 2.4 Anisotropía: Valores distintos de contracción en las tres direcciones o ejes.³⁰

Los diferentes valores de contracción radial y tangencial ocasionan la formación de rajaduras en los pedazos de madera redonda durante su secado y la aparición de grietas o deformaciones en las tablas, vigas o piezas de madera acerrada, todo esto se lo puede observar en la **Fig. 2.4**.

2.4. MOVIMIENTO MIGRATORIO DEL AGUA EN LA MADERA³¹

Una vez que se tiene la madera verde es decir recién cortada, esta empieza a perder humedad rápidamente al estar en contacto con el aire atmosférico, una de las razones es que el contenido de agua en el tronco o tablón no es uniforme, se tiene un mayor contenido de agua según como se acerca al centro del tronco en dirección radial. El agua en la madera se mueve de las zonas de alto contenido de

³⁰GRUPO ANDINO. (1989). "Manual del grupo andino para el secado de maderas", Lima, Perú, Carvajal,, pág. 34

³¹GRUPO ANDINO. (1989). "Manual del grupo andino para el secado de maderas", Lima, Perú, Carvajal,, pág. 36, 37, 38

humedad a las de más bajo contenido, una de las razones es alcanzar, por una parte, un equilibrio de humedad en la pieza de madera y, por otra, una condición de equilibrio entre la humedad de la pieza de la madera y las condiciones climáticas del medio circundante.

Si la temperatura y humedad relativa del ambiente circundante permanecen constantes, la madera tendría la tendencia de absorber o expulsar agua para alcanzar el equilibrio de humedad.

La humedad en la madera se mueve a través de varios tipos de conductos, siendo los principales las cavidades celulares o lúmenes, las punteaduras, los radios medulares, los espacios intermicelares de las paredes celulares y las perforaciones (en las latifoliadas).

Las características de estos ductos, determinan la velocidad del movimiento del agua en las tres direcciones o planos de corte. En madera normal, la velocidad del agua es, mayor en sentido longitudinal, algo menor en sentido radial y mínimo en sentido tangencial.

Esta variación en el movimiento del agua se debe a diferentes fuerzas que se presentan durante el secado. Estas son las siguientes:

2.4.1. FUERZAS CAPILARES

Son aquellas que ocasiona el movimiento del agua libre de una célula a otra a través de cavidades celulares.

Cuando una pieza de madera verde empieza a secarse, el agua que se encuentra en las capas superficiales empieza a evaporarse originando una fuerza de atracción o arrastre sobre el agua libre de las células adyacentes. El flujo capilar hace que el agua libre en el interior se mueva de una célula a otra buscando la superficie de la madera.

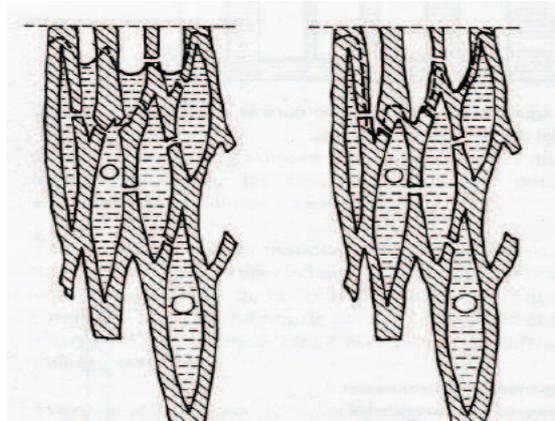


Figura 2. 5 Esquema del movimiento del agua en los capilares dentro de la madera ³²

2.4.2. FUERZAS DEBIDO A DIFERENCIAS EN LA PRESIÓN DE VAPOR

Cuando la atracción capilar cesa, casi toda el agua en el interior de la madera se ha convertido en vapor, por lo tanto las cavidades celulares se encuentran ocupadas por aire y vapor, la cantidad máxima se encontrará en el centro, decreciendo hacia la superficie. Cuando mayor es la cantidad de vapor mayor será la presión en dichas cavidades, lo que genera un gradiente de presión haciendo que el vapor migre de las zonas interiores hacia las exteriores que tienen una presión de vapor menor.

³²GRUPO ANDINO. (1989). *Manual del grupo andino para el secado de maderas*, Lima, Perú, Carvajal,, pág. 38

CAPÍTULO 3

DESARROLLO DEL MÉTODO DE SECADO EN HORNO

En este capítulo se estudiarán todas las etapas y características que se tienen en el proceso de secado de madera desde el calentamiento hasta el enfriamiento. La madera es un material de múltiples propiedades como la higroscopicidad, la cual permite que la madera gane o pierda humedad según condiciones del medio que la rodea. Por lo tanto, la humedad relativa del ambiente (HR), la temperatura y el contenido de humedad en equilibrio (CHE) son determinantes para que la madera adquiera un equilibrio higroscópico.

La madera obtendrá estabilidad dimensional cuando su contenido de humedad (CH) alcance un equilibrio con el contenido de humedad del ambiente.

3.1. ETAPAS DEL PROCESO DE SECADO

En el proceso de secado de madera en hornos convencionales, existen etapas que son comunes para todas las especies las mismas que se describen:

3.1.1. ETAPA DE CALENTAMIENTO DEL HORNO Y MADERA

Para el análisis del calentamiento del horno se supone que no existe generación calor en el interior de los materiales que componen la estructura del horno así como de los materiales que ingresan al mismo, el calor que ingresa al horno solamente es el proporcionado por el sistema de calentamiento. Los cambios en la energía interna de los materiales se deben al almacenamiento del calor suministrado.³³

3.1.1.1. Calentamiento de los materiales que componen el horno

Para conocer el calor que debe ingresar al horno por el concepto de calentamiento de la estructura es necesario calcular los volúmenes de cada material que lo

³³ F. INCROPERA, D. DEWITT, (1999), *Fundamentos de transferencia de calor*, México, Prentice Hall, Pág. 14.

componen, esto se lo puede realizar con los datos que se obtendrán al dimensionar el horno.

Las propiedades de los materiales que constituyen las paredes se pueden encontrar en tablas.

3.1.1.2. Calor para el calentamiento de los materiales de la estructura

$$Q_{\dot{Cal}} = \frac{V * \rho * Cp * (T_{ave} - T_a)}{\Delta t} \quad \text{Ec. (3. 1)}$$

Dónde:

$Q_{\dot{Cal}}$: Calor de calentamiento del material (KW)

V : Volumen neto del material a calentar (Kg)

ρ : Densidad del material a calentar (m^3/Kg)

Cp : Calor específico del material ($\frac{KJ}{Kg * K}$)

T_{ave} : Temperatura promedio entre el medio caliente y el ambiente (K)

T_a : Temperatura del ambiente (K)

Δt : Tiempo de calentamiento (h)

Los materiales que conforman la estructura del horno van sufrir un cambio de temperatura desde la ambiental hasta aproximadamente la temperatura de operación del horno, pero por facilidad de cálculo se considera que la temperatura que alcanza la estructura del horno va a ser una temperatura promedio entre la temperatura ambiente y la de operación del horno 60 °C.

$$T_{ave} = \frac{T_{Ho} + T_a}{2} \quad \text{Ec. (3. 2)}$$

Dónde:

T_{ave} : Temperatura promedio (K)

T_{Ho} : Temperatura de funcionamiento del horno (K)

T_a : Temperatura del ambiente (K)

3.1.1.3. Calentamiento de la madera húmeda

En la etapa inicial del secado se tiene que elevar la temperatura de la madera para poder evaporar el agua que se encuentra en su interior, este proceso se lo hace gradualmente y además debe estar apegado a las recomendaciones de las diferentes guías de secado de madera.

3.1.1.3.1. Calor para el calentamiento de la madera

Como se descartan los cambios de fases en los materiales presentes en el horno la energía a suministrar por concepto de calentamiento dependerá del calor específico, variación de temperatura, tiempo que dura el calentamiento y masas de material a calentar, todo esto se expresa en la ecuación 3.3.

$$\dot{Q}_{CM} = \frac{m * c_p * \Delta T}{t_{cal}} \quad \text{Ec. (3. 3)}$$

Dónde:

Q_{CM} : Calor para calentamiento de cada material a calentar (KW)

m : Masa de material a calentar (Kg)

c_p : Calor específico a presión constante de material a calentar [KJ/(Kg * K)]

ΔT : Variación de temperatura que sufre el material a calentar (K)

3.1.1.3.2. Calor específico de la madera³⁴

El calor específico de la madera depende de la temperatura y contenido de humedad, y es prácticamente independiente de la densidad de la especie.

³⁴<http://ojs.uo.edu.cu/index.php/tq/article/viewFile/2259/1800>

El calor específico de la madera seca se la puede obtener con la siguiente fórmula:

$$cp_o = 0.1031 + 0.3867 * 10^{-2} * T \quad \text{Ec. (3. 4)}$$

Dónde:

cp_o : Calor específico de la madera seca $\left(\frac{KJ}{Kg/K}\right)$

T : Temperatura a la que se encuentra la madera (K)

Sin embargo su valor cambia con el aumento del contenido de humedad. Por debajo del punto de saturación de las fibras se convierte en la suma de los calores específicos de la madera seca (cp_o) y el calor específico del agua (cp_w), mas un factor adicional de ajuste Ac que considera la energía adicional de enlace madera-agua.

$$cp_m = \frac{(cp_o + 0.01 * CH * cp_w)}{(1 + 0.01 * CH)} + Ac \quad \text{Ec. (3. 5)}$$

Dónde:

CH : Humedad de la madera (%)

cp_w : Calor específico del agua $[KJ/(Kg * K)]$

Ac : Factor de ajuste $[KJ/(Kg * K)]$

Estas ecuaciones son válidas para madera por debajo del punto de saturación de las fibras a temperaturas entre 7 y 147 °C, Ac se considera no significativo para valores de temperatura hasta 87 °C, siendo más significativo el efecto de la humedad sobre el calor específico.

3.1.1.3.3. *Tiempo de calentamiento*³⁵

Durante el calentamiento del horno se debe tener un aumento de la temperatura en un rango de 5 °C por hora, se puede notar que el calentamiento es lento, todo esto se lo hace para evitar que existan daños o defectos de la madera durante el secado ya que con calentamientos a rangos más altos, el aire puede transportar más cantidad de humedad lo que puede provocar acumulamientos de tensiones internas en la madera lo cual es independiente de la cantidad de madera.

$$t_{cal} = \frac{\Delta T}{\Delta T_{cal}} \quad \text{Ec. (3. 6)}$$

Dónde:

t_{cal} : Tiempo de calentamiento (h)

ΔT : Variación de temperatura en el horno (°C)

ΔT_{cal} : Tasa de calentamiento $\left(\frac{°C}{h}\right)$

3.1.1.4. *Calentamiento de los espaciadores*³⁶

La manera de facilitar que el aire pase a través de la pila de madera es utilizar espaciadores, estos espaciadores también presentan una determinada masa la cual debe ser calentada hasta la temperatura de operación utilizando una determinada cantidad de calor la cual también deberá ser suministrada.

Los separadores serán de madera con las dimensiones que se obtuvieron en el cálculo de las dimensiones del horno con un contenido de humedad entre el 10 y 12 %.

³⁵ VISCARRA SILVERIO, (1998) *Guía práctica para el secado en hornos*, pág. 9

³⁶ VISCARRA SILVERIO (1998). *Guía práctica para el secado de madera en hornos*, pág. 4.

3.1.2. ETAPA DE EVAPORACIÓN DEL AGUA EN LA MADERA

A fin de determinar las condiciones internas del horno se deben definir factores como la temperatura del horno, humedad de equilibrio de la madera respecto a la humedad relativa del ambiente. Estos factores se pueden definir utilizando las curvas de contenido de humedad de equilibrio.

En esta etapa también se da la evaporación del agua libre y el agua ligada, entonces será necesario definir como se evaporará el agua en la madera, así como también el tiempo que tomará esta etapa para esto se desarrollarán las curvas de secado.

3.1.2.1. Curvas de contenido de humedad de equilibrio

Bajo condiciones de temperatura y humedad relativa del ambiente definidos la madera siempre tiende a alcanzar un equilibrio de contenido de humedad, las curvas de contenido de humedad de equilibrio relacionan estos tres factores como se muestra en la **Figura 3.1**.

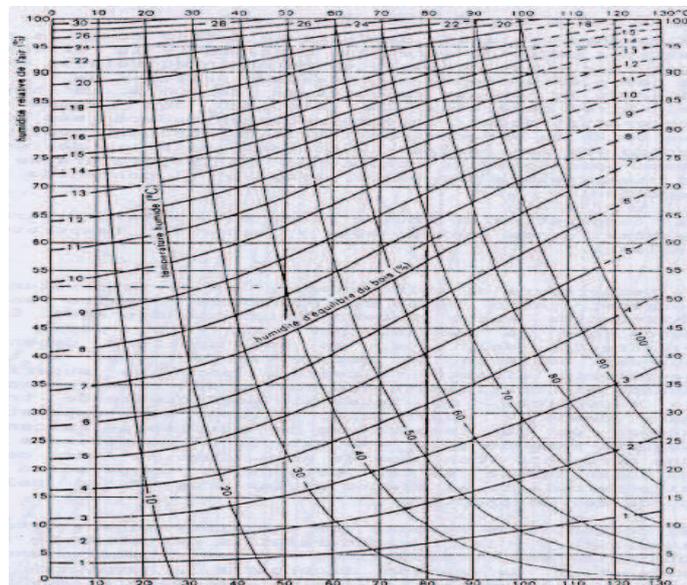


Figura 3. 1 Curva de humedad de equilibrio³⁷

³⁷ORBE, L. (1989). "Contenido de humedad de equilibrio de la madera en varias localidades del Ecuador, Quito, Ecuador, Pág.11

3.1.2.2. Tiempo de secado³⁸

El tiempo de secado depende directamente de cómo se da el movimiento del agua en la madera, es decir de cómo varía el contenido de humedad mas no depende la masa de madera a secar, en consecuencia se tienen gráficas como la **Figura 3.3** que relacionan el tiempo de secado con el contenido de humedad. El movimiento del agua también varía debido a las siguientes relaciones:

1. A mayor espesor el agua tiene que recorrer más espacios para poder salir de la madera.
2. La propia estructura de la madera es un limitante para el movimiento del agua por lo que se puede decir que depende de la densidad de la madera.
3. Al aumentar la temperatura del horno la capacidad del aire a captar humedad aumenta mejorando la evacuación del agua de la superficie de la madera.
4. El flujo de aire también juega un papel importante debido a que este es el encargado de transportar el agua que se evacua de la madera hacia el exterior del horno.

El tiempo de secado se obtiene con el fin de desarrollar las curvas de secado, un método estándar de obtener el tiempo de secado es buscar un tiempo básico de secado de la **Figura 3.3**, como se puede observar para cada contenido de humedad existe un tiempo de secado, por diferencia entre los tiempos que corresponden a cada contenido de humedad se obtiene un tiempo básico de secado, para el diseño se elige la curva para maderas frondosas debido a que este tipo de madera es más densa y dura, además para obtener el tiempo de secado real para el horno es necesario multiplicar el tiempo básico de secado por factores de corrección que dependen del espesor de los tablones a secar, densidad de la madera, temperatura de secado, velocidad del aire en el interior del horno, especie de madera y el agua libre como se describen en las **Tablas 3.1 a 3.6**.

³⁸ CHAPALBAY Y., REINOSO P. (2011). *Diseño y simulación del funcionamiento de un secador de flujo forzado para madera permeable con capacidad de 43 m³/MES, utilizando un quemador de biomasa*. Sangolqui, Ecuador. Págs. 72-74

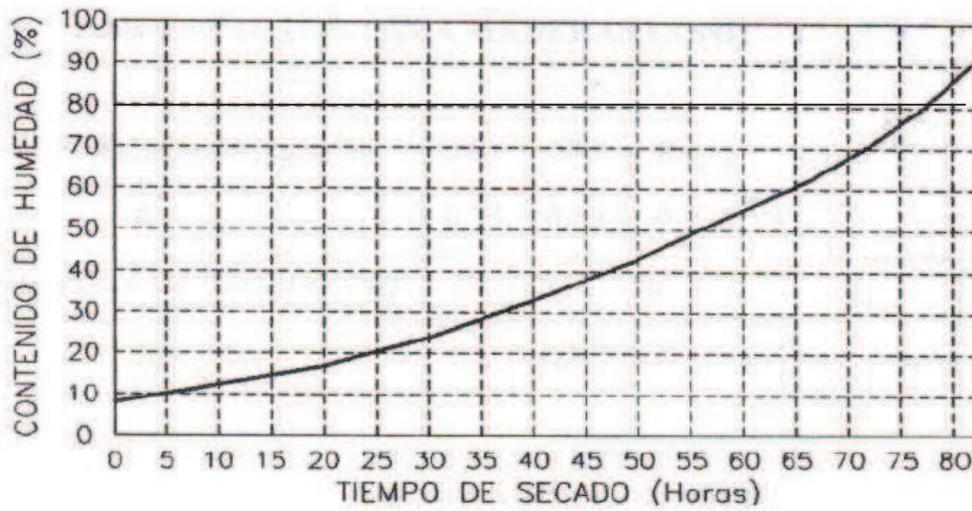


Figura 3. 2Tiempo básico de secado para maderas frondosas

$$t_{sb} = t_{SCH2} - t_{SCH1} \quad \text{Ec. (3. 7)}$$

Dónde:

t_{sb} : Tiempo de secado básico (h)

t_{SCH1} : Tiempo de secado para el contenido de humedad inicial (h)

t_{SCH2} : Tiempo de secado para el contenido de humedad final (h)

Tabla 3. 1Factor de corrección para tiempo de secado relacionado con el espesor

Espesor (mm)	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
f1	0.46	0.72	1	1.31	1.66	2.02	2.43	2.83	3.28	3.72	4.2
Espesor (mm)	70	75	80	85	90	95	100	110	120	130	140
f1	4.68	5.2	5.72	6.27	6.83	7.41	8	9.23	10.5	11.9	13.3

Tabla 3. 2 Factor de corrección para tiempo de secado con la densidad

PESO ESPECIFICO (kg/m^3)	500	600	620	650	680	710	740	770
f2	0.7	0.8	0.88	0.9	1	1.1	1.12	1.2

Tabla 3. 3 Factor de corrección para tiempo de secado relacionado con la temperatura de secado

TEMPERATURA DE SECADO (°C)	55	60	65	70	75	80	85	90	95
f3	1.7	1.5	1.3	1.2	1.1	1	0.9	0.8	0.7

Tabla 3. 4 Factor de corrección para tiempo de secado relacionado con la velocidad de secado

VELOCIDAD (m/s)	1.5	1.75	2	2.25	2.5	2.75	3
f4	1.19	1.08	1	0.93	0.87	0.83	0.78

Tabla 3. 5 Factor de corrección para tiempo de secado relacionado con la dificultad de secado

ESPECIES MADERA	DE	EUCALIPTO	LAUREL TIERNO
f5		2	1.4

Si la especie a secar es diferente a la tabulada en esta tabla se toma el factor de corrección igual a uno.

Tabla 3. 6 Factor de corrección para tiempo de secado relacionado con el agualibre (Contenido de humedad mayor a 30 %)

f6	1.1	Tiempo de secado hasta PSF
----	-----	----------------------------

Debajo del contenido de humedad menor a 30% este factor es igual a uno.

3.1.2.3. Tiempo de secado corregido

El tiempo de secado corregido es el tiempo básico de secado multiplicado por factores que modifican el movimiento del agua en la madera los cuales son obtenidos de las tablas anteriores.

$$t_s = t_{sb} * f_1 * f_2 * f_3 * f_4 * f_5 * f_6 \quad \text{Ec. (3.8)}$$

Dónde:

t_s : Tiempo de secado corregido (h)

f_1 : Factor de corrección debido al espesor (—)

f_2 : Factor de corrección debido a la densidad de la madera (—)

f_3 : Factor de corrección debido a la temperatura de secado (—)

f_4 : Factor de corrección debido a la velocidad de secado (—)

f_5 : Factor de corrección debido a la dificultad de secado (—)

f_6 : Factor de corrección debido al agua libre (—)

3.1.2.4. Curvas de secado³⁹

Las curvas de secado representan en una gráfica la variación del contenido de humedad de la madera en las diferentes etapas con respecto al tiempo de secado en horas como se muestra en la **Figura 3.2**. En primer lugar se tiene la etapa con contenido de humedad constante la cual es el proceso de calentamiento de los materiales.

³⁹ CHAPALBAY Y., REINOSO P. (2011). *Diseño y simulación del funcionamiento de un secador de flujo forzado para madera permeable con capacidad de 43 m³/MES, utilizando un quemador de biomasa*. Sangolquí, Ecuador. Págs. 72-74

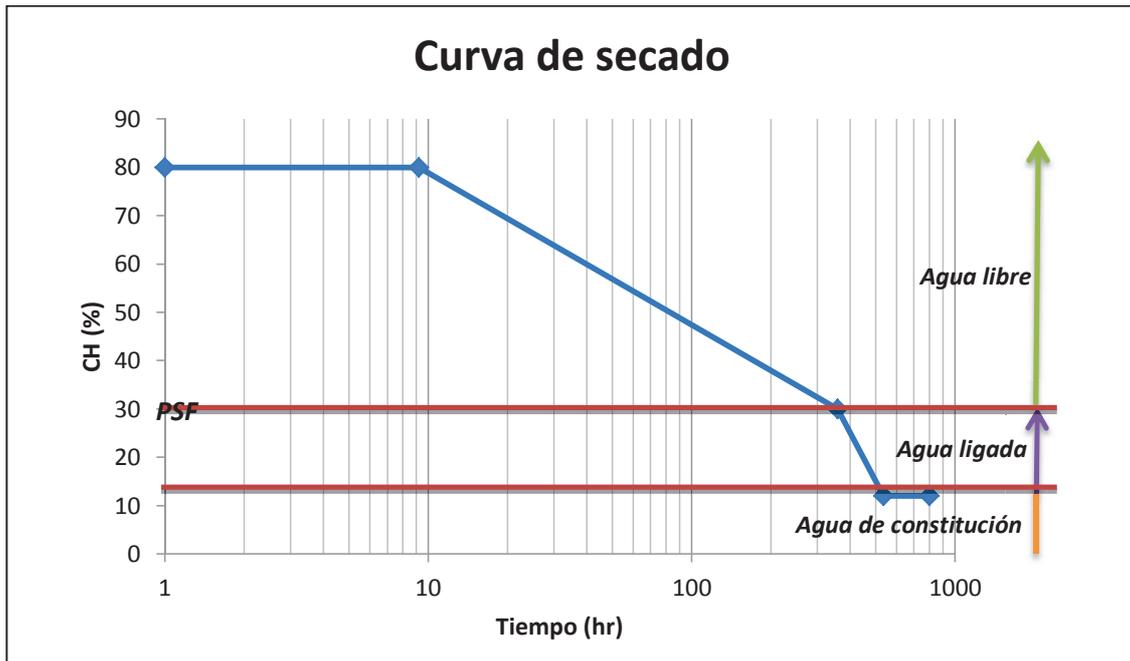


Figura 3. 3 Curva de secado. Contenido de humedad Vs tiempo

La segunda etapa se tiene un contenido de humedad decreciente el cual pertenece al proceso de vaporización del contenido de agua presente en la madera, este se subdivide en dos sub-etapas la primera que es el de contenido de humedad desde el 80% hasta el 30 % y la segunda desde el 30% hasta el 12 %.

La tercera etapa pertenece al proceso de acondicionamiento de la madera en el cual se tiene el horno a una temperatura fija para después proceder a un enfriamiento de toda la carga en el interior del horno cuando se apaga el horno.

3.1.2.5. Agua en la madera a evaporar

La masa de agua a evaporar depende del contenido de humedad de la madera, con esto se puede determinar el calor necesario a entregar para evaporar el agua.

3.1.2.5.1. Agua a evaporar para un contenido de humedad de 80 a 30 %

En este rango de contenido de humedad está presente el agua libre, que es fácil de evaporar siendo necesario para eliminarla solo el calor latente de vaporización, este tipo de agua no tiene ningún tipo de fuerza celular interna que le ayude a permanecer en el interior de la madera.

El calor latente de vaporización depende de la temperatura a la que se calientan los materiales por lo tanto el calor que se debe suministrar para eliminar el agua libre se da por la siguiente fórmula:

$$q_{Ev1} = h_{fg} * m \quad \text{Ec. (3. 8)}$$

Dónde:

q_{Ev1} : Energía a suministrar para vaporizar el agua libre (KJ)

h_{fg} : Calor latente de vaporización a la temperatura de operación del horno
60°C (KJ/Kg)

m : Masa de agua libre a evaporar (Kg)

3.1.2.5.2. Agua a evaporar para un contenido de humedad de 30 a 12 %

Este tipo de agua es más difícil de eliminar ya que esta retenida en las paredes celulares por las diferentes fuerzas de capilaridad y adsorción, esta agua está relacionado directamente con los fenómenos de hinchazón y encogimiento de la madera por lo que se debe tener cuidado durante esta etapa de eliminación ya que puede causar agrietamientos o acumulación de tensiones. Se considera agua ligada al contenido de humedad inferior al 30 % hasta llegar al contenido de humedad deseado.

Para romper estas fuerzas que ligan el agua con la madera es necesario adicionar a esta etapa a más del calor latente de vaporización un calor de adsorción el cual se utiliza para humedades entre 30 y 10 % este valor esta tabulado en tablas como la **Tabla 3.7**.

Tabla 3. 7Consumo de energía para romper lafuerzas que ligan el agua con madera ⁴⁰

Consumo de energía térmica		
Densidad de la madera	Agua libre 100% a 30 %	Agua de constitución 30 a 60 %
Kg/m ³	KJ/Kg	KJ/Kg
300-600	3500	4400
600-900	3800	4600
900-1200	4200	5000

$$q_{Ev2} = h_{fg} * m + h_{ad} * m \quad \text{Ec. (3. 9)}$$

Dónde:

q_{Ev2} : Energía para evaporar el agua de ligada (KJ)

h_{fg} : Calor latente de vaporización a una determinada temperatura (KJ/Kg)

m : Masa de agua libre a evaporar (Kg)

h_{ad} : Calor de adsorción debido a las fuerzas que ligan el agua (KJ/Kg)

3.1.2.6. Programa de secado⁴¹

Los programas u horarios de secado consisten en una tabla de temperaturas y depresiones psicrométricas que sirven de guía al operador para secar una madera dada, con rapidez razonable y con el menor deterioro posible.

En vista de los múltiples factores que intervienen en el secado de la madera y la variedad existente de diseños de hornos en funcionamiento, ningún programa u horario se considera como ideal. Los programas mencionados se aplican a hornos de tipo compartimiento, con circulación forzada de aire a velocidades entre 1 y 2 metros por segundo y temperaturas entre 38 y 90 °C.

⁴⁰ARIAS P. (2010). *Diseño de un sistema de secado de madera para la empresa parquet*. Riobamba, Ecuador. Pág. 131

⁴¹VISCARRA SILVERIO,1998*Guía práctica para el secado en hornos*, pag. 19

3.1.2.6.1. Horarios de Secado Practicados por el Pacto Andino en Maderas Regionales⁴²

A continuación se presentan programas que fueron desarrollados para maderas latifoliadas(en un corte transversal se observa como perforaciones denominadas comúnmente “poros”).

Tabla 3. 8 Programa Fuerte (F): para maderas latifoliadas de secado fácil

Contenido de humedad de la madera %	Temperatura °C		Humedad relativa aproximada %
	Termómetro seco	Termómetro húmedo	
Verde	60	56	80
60	65	58	70
50	70	60	60
40	75	61	50
30	80	62	40
20	80	60	35

Tabla 3. 9 Programa Moderado (M): para maderas latifoliadas de secado lento o que sean propensas a sufrir ciertas deformaciones o agrietamientos

Contenido de humedad de la madera %	Temperatura °C		Humedad relativa aproximada %
	Termómetro seco	Termómetro húmedo	
Verde	50	47	80
60	55	49	70
50	60	51	60
40	65	52	50
30	70	54	40
20	70	50	35

Tabla 3. 10 Programa Suave (S): para maderas latifoliadas de secado difícil

Contenido de humedad de la madera %	Temperatura °C		Humedad relativa aproximada %
	Termómetro seco	Termómetro húmedo	
Verde	40	37	80
40	40	35	70
30	45	37	60
25	50	40	50
20	55	42	40
15	55	37	30

⁴²VISCARRA SILVERIO, 1998 *Guía práctica para el secado en hornos*, pag. 30

3.1.2.6.2. Desarrollo del programa de secado⁴³

El programa de secado que se desarrolle está en función del tipo o especie y del espesor de la madera, a continuación se mostrarán los pasos para desarrollar el programa del laurel o también conocida como cordia (nombre científico) de 2" de espesor con un contenido del 80% de humedad inicial.

- Se seleccionan de la **Tabla 3.10** el horario sugerido para el caso del laurel de un espesor de 2" es el T3D1.
- Se procede a realizar el cuadro de 8 filas y 8 columnas con: número de paso de temperatura (PT°), número de paso de depresión de bulbo húmedo (PTBH°), contenido de humedad inicial de la madera (CH%), temperatura del bulbo seco (TBS°C), depresión psicrométrica (T°C), temperatura del bulbo húmedo (TBH°C), contenido de humedad de equilibrio (CHE%) de la madera y humedad relativa ambiente dentro del horno (HR%). Las dos primeras columnas son optativas, pero ayudan a controlar la elaboración del programa.

Tabla 3. 11 Desarrollo del cuadro de 8 filas por 8 columnas

P T°	P TBH°	CH%	TBS°C	T°C	TBH°C	CHE%	HR%
1	2	3	4	5	6	7	8

⁴³VISCARRA SILVERIO,1998 Guía práctica para el secado en hornos, pág. 7

- Para llenar la tercera columna se hace referencia al horario T3”D”1 seleccionado anteriormente en la parte de clase de madera según su CH en la **Tabla 3.12** se selecciona la columna D.

Tabla 3. 12 Llenado de la columna del de contenido de humedad en la madera

P T°	P TBH°	CH%	TBS°C	T°C	TBH°C	CHE%	HR%
1	2	3	4	5	6	7	8
		+50					
		50					
		40					
		35					
		30					
		25					
		20					
		15					

- Para la columna de TBS se selecciona la columna T3 de la **Tabla 3.11** tomando en cuenta la humedad inicial de cada paso.

Tabla 3. 13 Selección de las temperaturas de bulbo seco para cada paso

P T°	P TBH°	CH%	TBS°C	T°C	TBH°C	CHE%	HR%
1	2	3	4	5	6	7	8
		+50	43 ^{1/2}				
		50	43 ^{1/2}				
		40	43 ^{1/2}				
		35	43 ^{1/2}				
		30	49				
		25	54 ^{1/2}				
		20	60				
		12	71				

- En la quinta columna se llena con las depresiones de la **Tabla 3.12** correspondientes al número de programa que en este caso es el 1 (D1), se puede observar que a partir del sexto paso de la **Tabla 3.12** las depresiones se vuelven constantes e igual a 28 por lo que en el séptimo y octavo paso el valor de depresión es 28.

Tabla 3. 14 Selección de las depresiones psicométricas para cada paso.

P T°	P TBH°	CH%	TBS°C	T°C	TBH°C	CHE%	HR%
1	2	3	4	5	6	7	8
		+50	43 ^{1/2}	1 ^{1/2}			
		50	43 ^{1/2}	2			
		40	43 ^{1/2}	3 ^{1/2}			
		35	43 ^{1/2}	5 ^{1/2}			
		30	49	14			
		25	54 ^{1/2}	28			
		20	60	28			
		12	71	28			

- Para llenar la sexta columna se resta la TBS menos T (depresión) de cada una de las filas.

Tabla 3. 15 Selección de la temperatura de bulbo húmedo

P T°	P TBH°	CH%	TBS°C	T°C	TBH°C	CHE%	HR%
1	2	3	4	5	6	7	8
		+50	43 ^{1/2}	1 ^{1/2}	42		
		50	43 ^{1/2}	2	41 ^{1/2}		
		40	43 ^{1/2}	3 ^{1/2}	40		
		35	43 ^{1/2}	5 ^{1/2}	38		
		30	49	14	35		
		25	54 ^{1/2}	28	26 ^{1/2}		
		20	60	28	32		
		12	71	28	43		

- Con ayuda de la **Tabla 3.13** se determina los valores de la séptima columna (CHE%) y de la octava columna (HR%) tomando en cuenta TBS y diferencia psicrometrica en cada uno de los pasos (se interpola si es el caso), por ejemplo para el primer paso a una TBS= $43\frac{1}{2}$ °C y una T= $11\frac{1}{2}$ °C tenemos un CHE =19.5% y HR=91%.

Tabla 3. 16Selección de CHE% y HR% para cada paso.

P T°	P TBH°	CH%	TBS°C	T°C	TBH°C	CHE%	HR%
1	2	3	4	5	6	7	8
		+50	$43\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	42	19.5	91
		50	$43\frac{1}{2}$	2	$41\frac{1}{2}$	18	88
		40	$43\frac{1}{2}$	$3\frac{1}{2}$	40	15	80
		35	$43\frac{1}{2}$	$5\frac{1}{2}$	38	12	71
		30	49	14	35	6.5	40
		25	$54\frac{1}{2}$	28	$26\frac{1}{2}$	2.5	22
		20	60	28	32	2.5	14
		12	71	28	43	3	20

- Para llenar PT° (primera fila) se observa el cambio de la TBS en este caso la TBS es de $43\frac{1}{2}$ °C hasta la cuarta fila por lo que dicha fila sigue siendo el primer paso de TBS y las otras filas van cambiando.

Tabla 3. 17 Cambio de paso de temperatura de bulbo seco.

P T°	P TBH°	CH%	TBS°C	T°C	TBH°C	CHE%	HR%
1	2	3	4	5	6	7	8
1		+50	43 _{1/2}	1 _{1/2}	42	19.5	91
1		50	43 _{1/2}	2	41 _{1/2}	18	88
1		40	43 _{1/2}	3 _{1/2}	40	15	80
1		35	43 _{1/2}	5 _{1/2}	38	12	71
2		30	49	14	35	6.5	40
3		25	54 _{1/2}	28	26 _{1/2}	2.5	22
4		20	60	28	32	2.5	14
5		12	71	28	43	3	20

- Para llenar PTBH (segunda fila) se observa el cambio de depresiones psicrometricas de la quinta fila y se observa que a partir de la sexta fila las depresiones se mantienen constantes e igual a 28 por lo que el paso PTBH no varía a partir de la sexta fila.

Tabla 3. 18 Cambio de paso de depresiones psicométricas.

P T°	P TBH°	CH%	TBS°C	T°C	TBH°C	CHE%	HR%
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	+50	43 _{1/2}	1 _{1/2}	42	19.5	91
1	2	50	43 _{1/2}	2	41 _{1/2}	18	88
1	3	40	43 _{1/2}	3 _{1/2}	40	15	80
1	4	35	43 _{1/2}	5 _{1/2}	38	12	71
2	5	30	49	14	35	6.5	40
3	6	25	54 _{1/2}	28	26 _{1/2}	2.5	22
4	6	20	60	28	32	2.5	14
5	6	12	71	28	43	3	20

La **Tabla 3.18** muestra el programa de secado para una carga de laurel de 2" con un contenido de humedad mayor al 80%, este programa se puede modificar si cambian los parámetros como el contenido de humedad inicial en la madera, a menudo se requiere que el operador del horno haga algunas modificaciones, necesarias desde su propia observación.

3.1.2.6.3. *Tiempo de cada paso del programa de secado.*

Para obtener el tiempo que debe tener cada paso se relaciona el contenido de humedad con el tiempo de secado de la **Ecuación 3.7** definiendo así la curva de secado. Excepto el primer paso que es la etapa de calentamiento que se obtiene con la ecuación 3.6 de acuerdo a la tasa de calentamiento.

Utilizando la ecuación 3.6 se determina el tiempo que necesita el horno para calentarse.

Para los cálculos se toma como temperatura media del ambiente 14 °C.

$$t_{cal} = \frac{\Delta T}{\dot{\Delta T}_{cal}}$$

$$t_{cal} = \frac{43.5 - 14 \text{ } ^\circ\text{C}}{5 \frac{\text{ } ^\circ\text{C}}{h}} = 5.9 h$$

El tiempo que se necesita para pasar al segundo paso se lo calcula de la siguiente manera, utilizando la ecuación 3.7 y 3.8.

$$t_{sb} = t_{S_{80\%CH}} - t_{S_{50\%CH}}$$

$$t_{sb} = 77hr - 56hr = 21hr$$

$$t_s = t_{sb} * f_1 * f_2 * f_3 * f_4 * f_5 * f_6$$

$$t_s = 21 * 2.83 * 1.1 * 1.5 * 1.19 * 1.4 * 1.1$$

$$t_s = 179.7hr$$

Tabla 3. 19 Tiempo de cada paso del programa de secado.

P	TBH°	CH%	Tiempo (hr)
2		3	
1		+50	5.9
2		50	179.7
3		40	77.016
4		35	42.78
5		30	51.34
6		25	31.11
6		20	54.45
6		15	70.014
6		12	38.89
Tiempo total			551.2

Como se puede ver en la **Tabla 3.19** el tiempo total de secado es igual a 551.2 horas (23 días) lo cual comparado con el secado al ambiente es mucho menor ya que este puede durar meses.

Tabla 3. 20 Peso Especifico Básico, Densidad y Programas de Secado

No.	Nombre común	Nombre científico	Peb*	Dad** 12%	Horario***	
					1"	2"
1	Ajipa, Jorori	<i>Swartzia sp.</i>	0,64	---	(T2-C2)	(T2-C1)
2	Amargo	<i>Simarouba amara</i>	0,36	---	Fuerte	---
3	Amarillo	<i>Aspidosperma sp.</i>	0,61	0,73	(T6-D2)	(T3-D1)
4	Azucaró, Cedrillo	<i>Spondias mombim</i>	0,36	---	Fuerte	---
5	Balsa	<i>Ochroma pyramidale</i>	0,20	---	(T10-D4S)	(T8-D3S)
6	Borracho, Guitarrero	<i>Didymopanax morototoni</i>	0,40	---	Fuerte	---
7	Cambar	<i>Erisma uncinatum</i>	0,46	0,57	(T1-D2)	---
8	Cedro	<i>Cedrela spp.</i>	0,42	0,50	(T10-D4S)	(T8-D3S)
9	Copaibo	<i>Copaifera sp.</i>	0,60	0,70	MODERADO	---
10	Cuchi	<i>Astronium urundeuva</i>	1,00	1,22	(T1-B1)	---
11	Curupaú, Cebil	<i>Anadenanthera macrocarpa</i>	0,85	1,02	(T8-B3)	(T5-B1)
12	Cutá beniana	<i>Astronium graveolens</i>	0,86	---	(T3-C2)	---
13	Cuta blanca, Perilla	<i>Ptylostylon sp.</i>	0,79	0,95	(T2-B2)	---
14	Gabún, Sangre de toro	<i>Virola boliviensis</i>	0,39	0,48	(T3-C2)	(T3-C1)
15	Guapi	<i>Guarea sp.</i>	0,58	---	(T6-D2)	(T3-D1)
16	Guayabochi	<i>Calycophyllum spruceanum</i>	0,75	0,81	(T2-C2)	(T2-C1)
17	Isigo	<i>Protium sp.</i>	0,54	---	(T3-C2)	(T3-C1)
18	Japunaqui	<i>Cordia sp.</i>	0,66	---	(T6-D2)	(T3-D1)
19	Jichituriqui, Gabetillo	<i>Aspidosperma pyriforme</i>	0,73	0,89	(T6-D2)	(T3-D1)
20	Laurel amarillo	<i>Nectandra sp.</i>	0,45	0,53	SUAVE	---
21	Mapajo	<i>Ceiba pentandra</i>	0,51	0,62	(T10-D5S)	(T8-D4S)
22	Mara	<i>Swietenia macrophylla</i>	0,43	0,54	(T6-D4)	(T3-D3)
23	Mara macho	<i>Cedrelinga catenaeformis</i>	0,46	0,57	MODERADO	---
24	Momoqui	<i>Caesalpinia peltophoroides</i>	0,89	1,05	(T3-C2)	(T3-C1)
25	Mora	<i>Chlorophora tinctoria</i>	0,81	0,96	MODERADO	---
26	Morado del Beni	<i>Peltogyne porphyrocardia</i>	0,86	---	(T6-D2)	(T3-D1)
27	Morado Chiquitos	<i>Peltogyne sp.</i>	0,84	0,99	(T6-D2)	(T3-D1)
28	Mururé, Mascajo	<i>Clarisia racemosa</i>	0,61	0,70	SUAVE	---
29	Nogal	<i>Juglans australis</i>	0,50	0,59	(T6-D4)	(T3-D3)
30	Nuí, ojoso colorado	<i>Pseudolmedia laevigata</i>	0,76	0,90	MODERADO	---
31	Ochoó, Solimán	<i>Hura crepitans</i>	0,44	0,52	(T6-D2)	(T3-D1)

*Peso específico básico (peso seco al horno/volumen verde)

** Valor en g/cm³, madera seca al 12 %de C.H.

*** Horarios sugeridos para piezas de 1" y 2" de espesor.

Tabla 3. 21 Programas Generales de Temperatura para Maderas Latifoliadas⁴⁴

Paso Nº	%CH* al Inic.	TEMPERATURAS DEL TERMOMETRO SECO EN °C													
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14
1	+30	38	38	43½	43½	49	49	54½	54½	60	60	65½	71	76½	82
2	30	40½	43½	49	49	54½	54½	60	60	65½	65½	71	76½	82	88
3	25	40½	49	54½	54½	60	60	65½	65½	71	71	71	76½	82	88
4	20	46	54½	60	60	65½	65½	71	71	71	76½	76½	82	88	93
5	15	49	65½	71	82	71	82	71	82	71	82	82	82	88	93

*Contenido de humedad al iniciar el paso.

Tabla 3. 22 Programas Generales de Temperatura para Maderas Latifoliadas⁴⁵

Paso DEP Nº	DEPRESIONES DEL TERMOMETRO HUMEDO, °C														
	CLASE DE MADERA SEGUN SU CH VERDE*						DEPRESIONES CORRESPONDIENTES AL Nº DEL PROGRAMA								
	A	B	C	D	E	F	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	+30	+35	+40	+50	+60	+70	1½	2	3	4	5½	8½	11	14	
2	30	35	40	50	60	70	2	3	4	5½	8	11	16½	19½	
3	25	30	35	40	50	60	3½	4½	6	8½	11	16½	22	28	
4	20	25	30	35	40	50	5½	8	10½	14	19½	28	28	28	
5	15	20	25	30	35	40	14	16½	19½	22	28	28	28	28	
6	10	15	20	25	30	35	28	28	28	28	28	28	28	28	

* Contenido de humedad al comienzo del paso.

⁴⁴VISCARRA SILVERIO,1998 Guía práctica para el secado en hornos, pag. 29

⁴⁵VISCARRA SILVERIO,1998 Guía práctica para el secado en hornos, pag. 29

Tabla 3. 23 Humedad Relativa Ambiente y Contenido de Humedad de Equilibrio de la Madera para Diferentes Temperaturas del Bulbo Seco y Depresiones del Bulbo Húmedo⁴⁶

T °C	Humedad %	Diferencia Psicrométrica en °C																					
		1	1 1/2	2	2 1/2	3	3 1/2	4	4 1/2	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	22	25	28
5	H.R.	86	79	72	65	58	52	45	39	33	20	7											
	C.H.E.	19	16	14	12	11	9,5	8,5	7,5	6,5	4,5	1,5											
15	H.R.	90	85	80	75	71	66	61	57	53	44	36	27	20	13								
	C.H.E.	20,5	18	16	14,5	13	12	11	10,5	10	8	7	6	4,5	3								
25	H.R.	92	88	84	81	77	74	70	67	63	57	50	44	39	33	22	12						
	C.H.E.	21,5	19,5	17,5	16	15	14	13	12	11,5	10	9	8	7,5	6,5	5	2,5						
35	H.R.	94	90	87	84	81	78	75	72	69	64	59	54	49	44	36	28	20	13	7			
	C.H.E.	22	19,5	18	16,5	15,5	14,5	13,5	13	12	11	10	9,5	8,5	8	6,5	6	4	3	1,5			
40	H.R.	94	91	88	85	82	80	77	74	72	67	62	57	53	48	40	33	26	20	14	6		
	C.H.E.	22	19,5	18	17	16	15	14	13	12,5	11,5	10,5	9,5	9	8	7	6	5	4	3	1,5		
45	H.R.	94	91	88	85	83	80	78	75	73	69	64	60	56	52	44	37	30	25	19	14		
	C.H.E.	22	19,5	18	17	15,5	15	14	13,5	12,5	11,5	10,5	10	9	8	7	6,5	5,5	4,5	4	3		
50	H.R.	95	92	89	86	83	81	79	76	74	70	65	61	58	54	46	40	34	29	24	18	12	5
	C.H.E.	22	19,5	18	16,5	15,5	15	14	13,5	12,5	11,5	10,5	10	9	8,5	7,5	6,5	5,5	5	4	3,5	2,5	1
55	H.R.	95	92	90	87	84	82	80	78	76	72	67	63	60	56	50	43	37	32	27	22	16	10
	C.H.E.	21,5	19,5	18	16,5	15,5	14,5	13,5	13	12,5	11,5	10,5	10	9	8,5	7,5	6,5	6	5	4,5	4	3	2
60	H.R.	95	92	90	88	85	83	81	79	77	73	69	65	61	58	52	45	40	35	30	25	20	14
	C.H.E.	21,5	19	17,5	16,5	15,5	14,5	13,5	13	12,5	11,5	10,5	10	9	8,5	7,5	7	6	5,5	4,5	4	3,5	2,5
65	H.R.	95	93	91	88	86	84	82	80	78	74	70	66	63	60	53	47	42	37	32	28	22	17
	C.H.E.	21	19,5	17	16	15	14	13,5	13	12,5	11,5	10,5	10	9	8,5	7,5	7	6	5,5	5	4	3,5	3
70	H.R.	96	93	91	88	86	84	83	81	79	75	71	68	65	61	55	50	44	40	35	31	25	20
	C.H.E.	20,5	18,5	17	15,5	15	14	13,5	13	12	11	10,5	9,5	9	8,5	7,5	7	6	5,5	5	4,5	3,5	3
75	H.R.	96	93	91	89	87	85	83	82	80	76	72	69	66	63	57	51	46	41	38	33	28	22
	C.H.E.	20	18	16,5	15,5	14,5	14	13	12,5	12	11	10	9,5	9	8,5	7,5	6,5	6	5,5	5	4,5	3,5	3
80	H.R.	97	93	91	89	87	86	84	82	81	77	74	70	67	64	59	53	48	43	40	36	30	25
	C.H.E.	19,5	17,5	16	15	14,5	13,5	13	12,5	12	11	10	9,5	8,5	8	7,5	6,5	6	5,5	5	4,5	4	3,5
85	H.R.	97	93	91	90	88	86	84	82	81	78	74	71	68	65	60	54	49	45	41	38	32	27
	C.H.E.	19,5	17	16	15	14	13,5	12,5	12	11,5	10,5	10	9	8,5	8	7	6,5	6	5,5	5	4,5	4	3,5

To = Temperatura del bulbo seco (°C)

HR = Humedad relativa (%)

CHE = Contenido de humedad de equilibrio (%)

⁴⁶VISCARRA SILVERIO,1998,Guía práctica para el secado en hornos, anexo 2

3.1.3. ETAPA DE ACONDICIONAMIENTO

Mantener la temperatura del horno del paso final del programa y establecer una humedad relativa dentro del horno que proporcione un CHE aproximadamente un 4 % por encima del valor promedio final buscado para la carga. En caso del ejemplo, se debe fijar el CHE a un 16 % (cuatro por ciento mayor que 12 %, humedad final deseada), con esto además se logra liberar las tensiones de la madera.

3.1.4. ETAPA DE ENFRIAMIENTO

Después de liberadas las tensiones de la madera, cortar el ingreso de los gases calientes. Apagar el horno dejando las puertas cerradas hasta que la temperatura del mismo registre un valor por lo menos de 10 °C por encima de la temperatura del ambiente externo. Abrir el horno y descargar la madera.

CAPÍTULO 4

DISEÑO DEL HORNO PARA SECADO DE MADERA

Este capítulo trata sobre todas las características técnicas y parámetros que son necesarias para el diseño del horno de secado de madera.

Estas características dependen de las necesidades que se requieren, tales como producción que para este caso son 700 tablones de madera al mes, y contenido de humedad final en la madera, se mencionará cada parte de la cámara de secado, definiendo las dimensiones, materiales, y otros aspectos, además se desarrollará el cálculo térmico del horno.

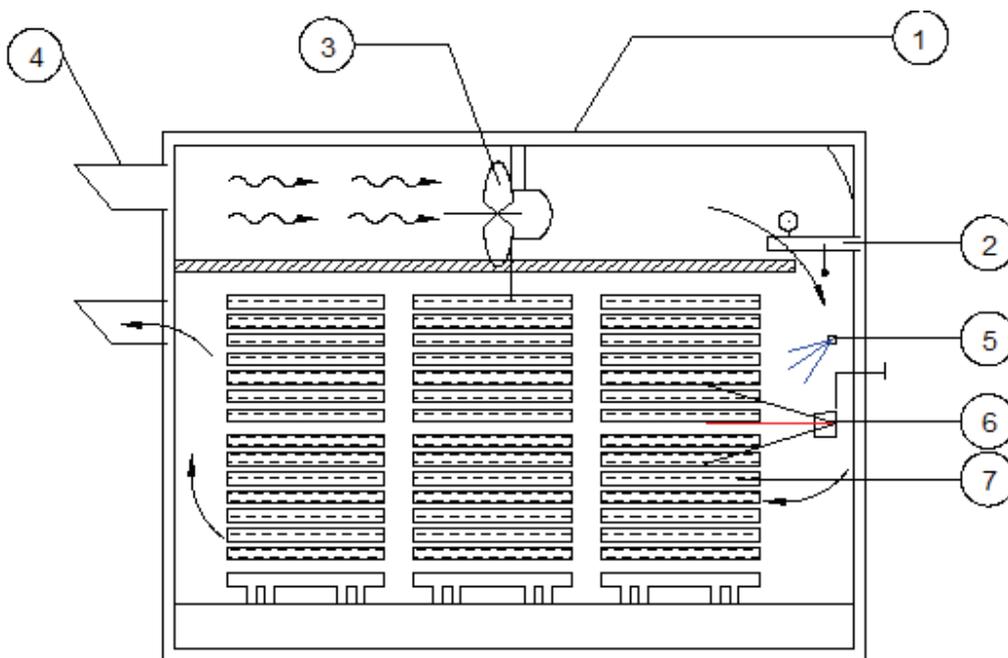


Figura 4. 1 Horno para secado de madera

1. Cámara de secado
2. Intercambiador de calor
3. Ventilador
4. Ventilas regulables.
5. Sistema de humectación.

6. Sistema de mando y control.
7. Madera a secarse.

4.1. DIMENSIONAMIENTO DE LA CÁMARA DE SECADO

Se puede determinar el volumen que ocupará toda la carga en el interior del horno, sabiendo el volumen que ocupa 700 (23 m³) tablones de madera y las recomendaciones de apilamiento.

4.1.1. DIMENSIONES DEL TABLON DE MADERA

El tamaño de los tablones que en general se encuentran en cualquier aserradero del Ecuador es:

Tabla 4. 1 Dimensiones del tablón de madera aserrada

Ancho	0.25m
Espesor	0.05 m
Largo	2.5 m



Figura 4. 2 Tablón de madera aserrada.⁴⁷

⁴⁷<http://www.mausa.es/productos/fotos/tablon20.jpg>

4.1.2. DIMENSIONAMIENTO DE LOS SEPARADORES

Los separadores recomendados para espesores entre 40-65 mm son de 30-40 mm y la distancia recomendada entre separadores está entre 700-800 mm.⁴⁸



Figura 4. 3 Medidas de espaciamento de la pila de madera (mm)

4.1.3. APILAMIENTO DE LA MADERA

Para la formación de pilas se recomienda que cada paquete de madera debe tener las siguientes dimensiones 2,5 x 1,1 x 1,1 metros. Estos se colocarán hasta un máximo de cuatro paquetes en altura para formar pilas estables y no más de cinco pilas de profundidad, para favorecer que la velocidad de paso de aire sea similar a la entrada y a la salida de las pilas.⁴⁹

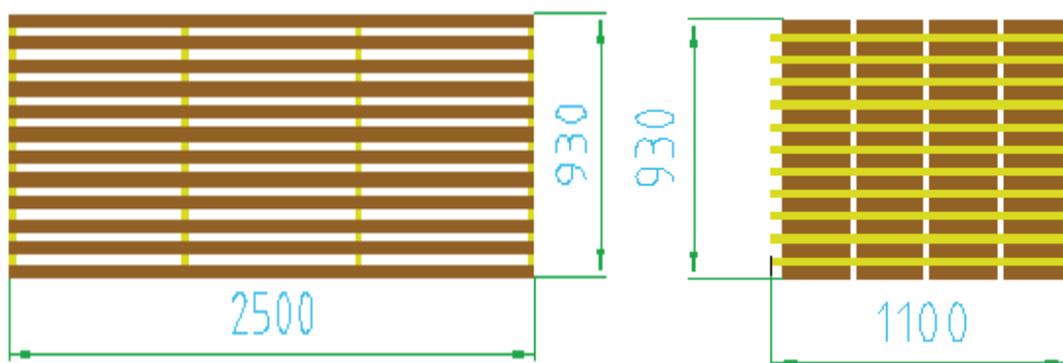


Figura 4. 4 Dimensiones del paquete de madera en milímetros

⁴⁸PEDRAS FRANCISCO. *Secado de la madera: Recomendaciones prácticas*, revista Cis Madera, pag. 50

⁴⁹PEDRAS FRANCISCO. *Secado de la madera: Recomendaciones prácticas*, revista Cis Madera, pag. 50

Con estas dimensiones del paquete se puede obtener 14 filas por 4 columnas que dan como resultado 52 tablones por paquete.

Para el dimensionamiento del horno se tomarán paquetes de 12 filas por 4 lo cual da como resultado 48 tablones por paquete, estos se colocaran en 3 paquetes de altura y 5 paquetes de profundidad, todo esto está dentro de las recomendaciones y dará como resultado 720 tablones.

Se debe poner espaciadores de 50 mm entre cada fila de paquetes para facilitar el movimiento de estos con ayuda de un montacargas si es el caso, además cada paquete se asegura con correas para evitar que se desarmen al momento de ingresar al horno.

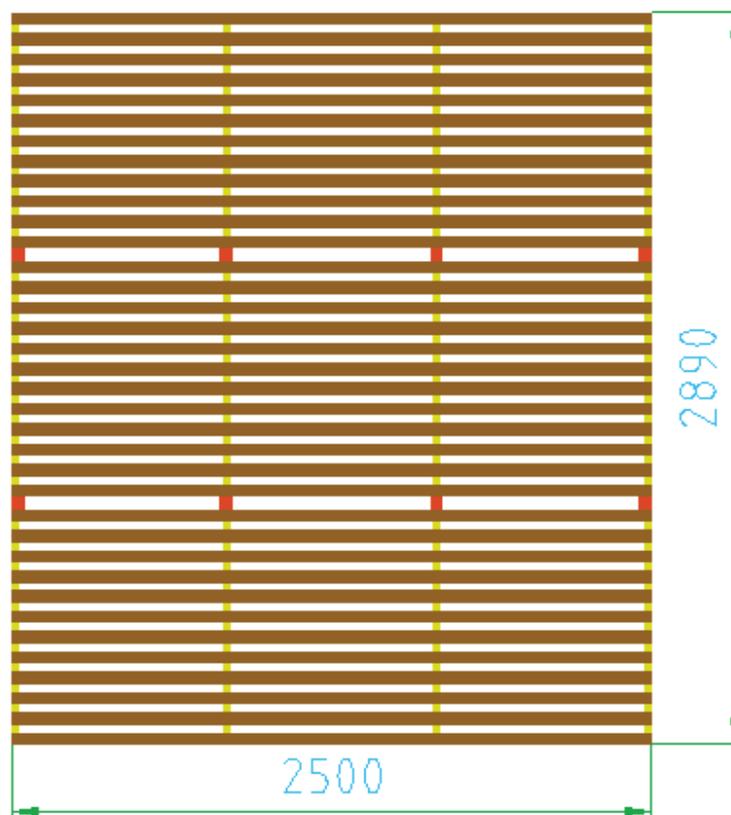


Figura 4. 5 Dimensiones de la pila de madera (mm)

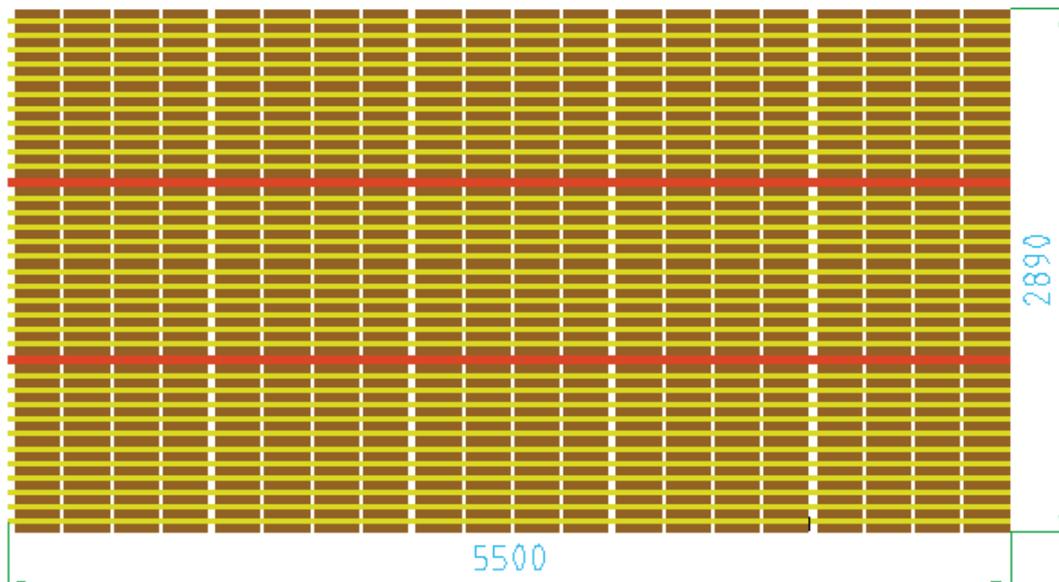


Figura 4. 6 Dimensiones de la pila de madera (mm)

Resumen de dimensiones de la pila de madera:

- Alto: 2.89 m
- Ancho: 2.5 m
- Profundidad: 5.5 m

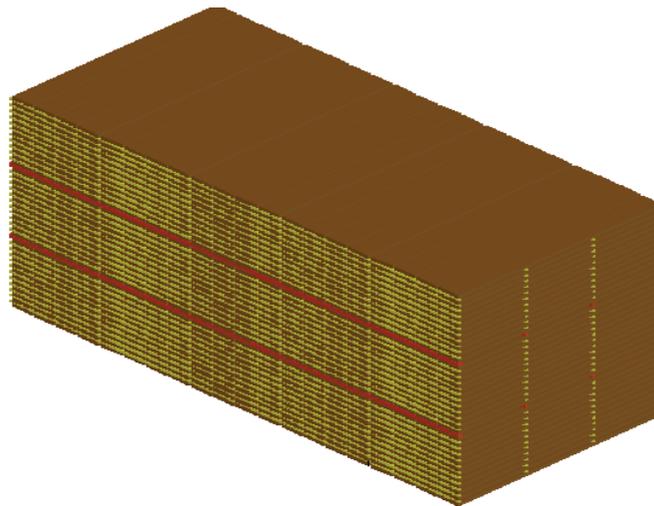


Figura 4. 7 Forma de la pila de madera

Se recomienda para un buen flujo de aire y para tener un espaciado para las personas que apilan la madera dejar una separación entre 0.6 y 1.4 m entre las pilas y las paredes del horno.⁵⁰

Sumando 0.6 m por cada lado al ancho y a la profundidad de la pila y aumentando 0.5 m de altura para la facilidad de apilamiento, se tiene las dimensiones internas del horno:

- Alto: 3.4 m
- Ancho: 3.7 m
- Profundidad: 6.7 m

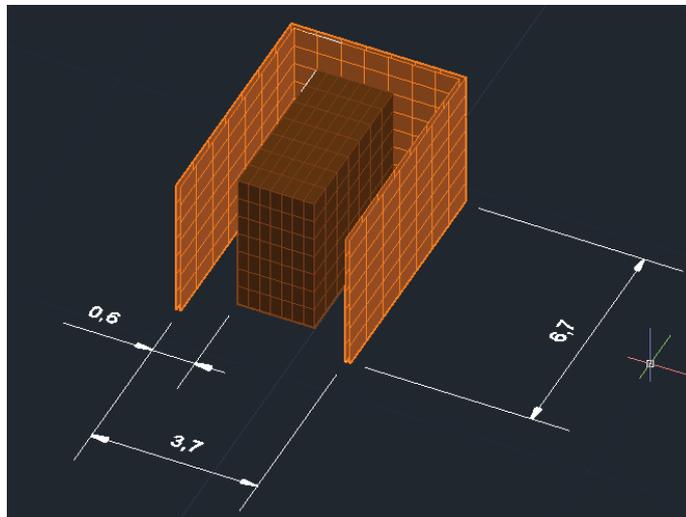


Figura 4. 8 Dimensiones de espaciado entre la pila de madera y las paredes del horno

4.2. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL HORNO

4.2.1. MATERIALES DEL CUAL SE COMPONEN EL HORNO DE SECADO

Las paredes del horno deben poseer características como:

- Hermeticidad
- Buen aislamiento térmico.
- Resistencia a la corrosión por los ácidos liberados por la madera en el proceso de secado.

⁵⁰MELO R. Madera, Programa Nacional de apoyo a la pequeña y mediana industria, 1993, pág. 34-85

- Resistencia a temperaturas alrededor de los 60°C (temperatura máxima alcanzada).

El material que más se ajusta a las características mencionadas y además el más utilizado para la construcción de hornos en el Ecuador es el ladrillo por lo cual se seleccionará para constituir las paredes del horno.

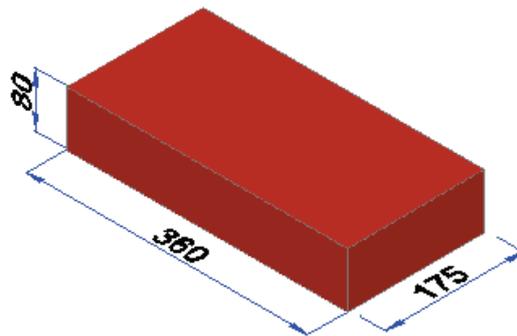


Figura 4. 9 Ladrillo

4.2.1.1. Constitución de las paredes del horno

Los materiales que constituyen la pared del horno son los siguientes:

- Mortero
- Ladrillo(mampuesto)

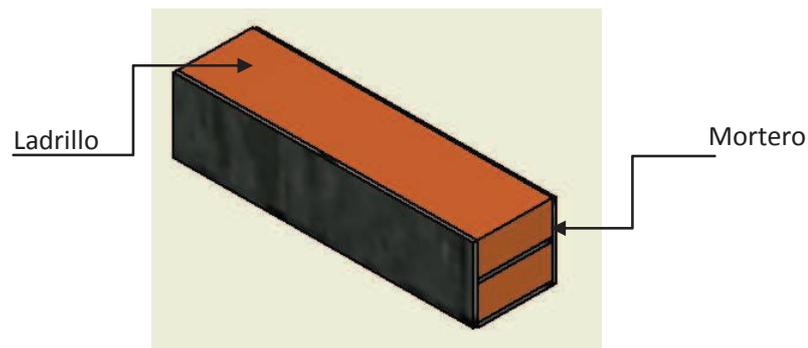


Figura 4. 10 Arreglo de la pared del horno

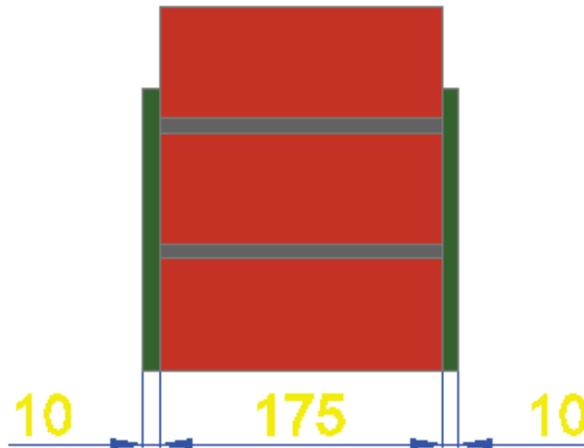


Figura 4. 11 Composición de la pared del horno (mm)

4.2.1.1.1. Mortero

Consiste en una mezcla de cemento y arena con una cierta cantidad de agua, esta mezcla es aplicada sobre la superficie de la pared de ladrillo y produce unión y cierre entre los ladrillos cuya función es de impedir el escape de los gases por las juntas unidas y protege contra el ataque abrasivo, todos estos beneficios se obtienen aplicando una pequeña capa con un espesor mínimo.

Tabla 4. 2 Propiedades del mortero

Material	Propiedades a 300 K		
	Densidad	Conductividad térmica	Calor especifico
	(kg/m^3)	(W/m-K)	(J/Kg-K)
Mortero	1860	0.72	780

4.2.1.1.2. Ladrillo (mampuesto)

Un ladrillo es una pieza de construcción, generalmente cerámica y con forma ortoédrica, cuyas dimensiones permiten que se pueda colocar con una sola mano por parte de un operario. Para evitar resquebrajaduras en el área interior del horno es preferible usar materiales aglutinantes como una capa de mortero que generalmente se llama enlucido.

Tabla 4. 3 Propiedades del mampuesto

Material	Propiedades a 300 K		
	Densidad	Conductividad t�mica	Calor especifico
	(kg/m ³)	(W/m-K)	(J/Kg-K)
Ladrillo común	1920	0.72	835
Ladrillo de frente	2083	1.3	-

4.2.1.2. Puerta

La ejecución de la puerta es uno de los aspectos de mayor cuidado en el montaje de la cámara de secado, ya que es donde se pierde un porcentaje del calor que entrega el sistema de calefacción a la cámara de secado.

Las características principales que debe tener la puerta son:

- De peso ligero para fácil movilidad.
- Hermeticidad
- Debe estar construida en materiales resistentes a la corrosión.
- Buen aislamiento tímico.
- Resistencia a temperaturas alrededor de los 43.5 C (temperatura máxima alcanzada).
- Debe tener una fácil maniobrabilidad.
- Debe facilitar la entrada y salida de la carga de madera.

El espacio para las puertas es de 3.7 m de ancho por 3.4 de alto, por lo que la puerta será de doble hoja abatible hacia afuera con bisagras, en la **Figura 4.12** se muestra cual será el diseño para cada puerta, para más detalles de la puerta observar el plano 3.3059.102 del Anexo 3.

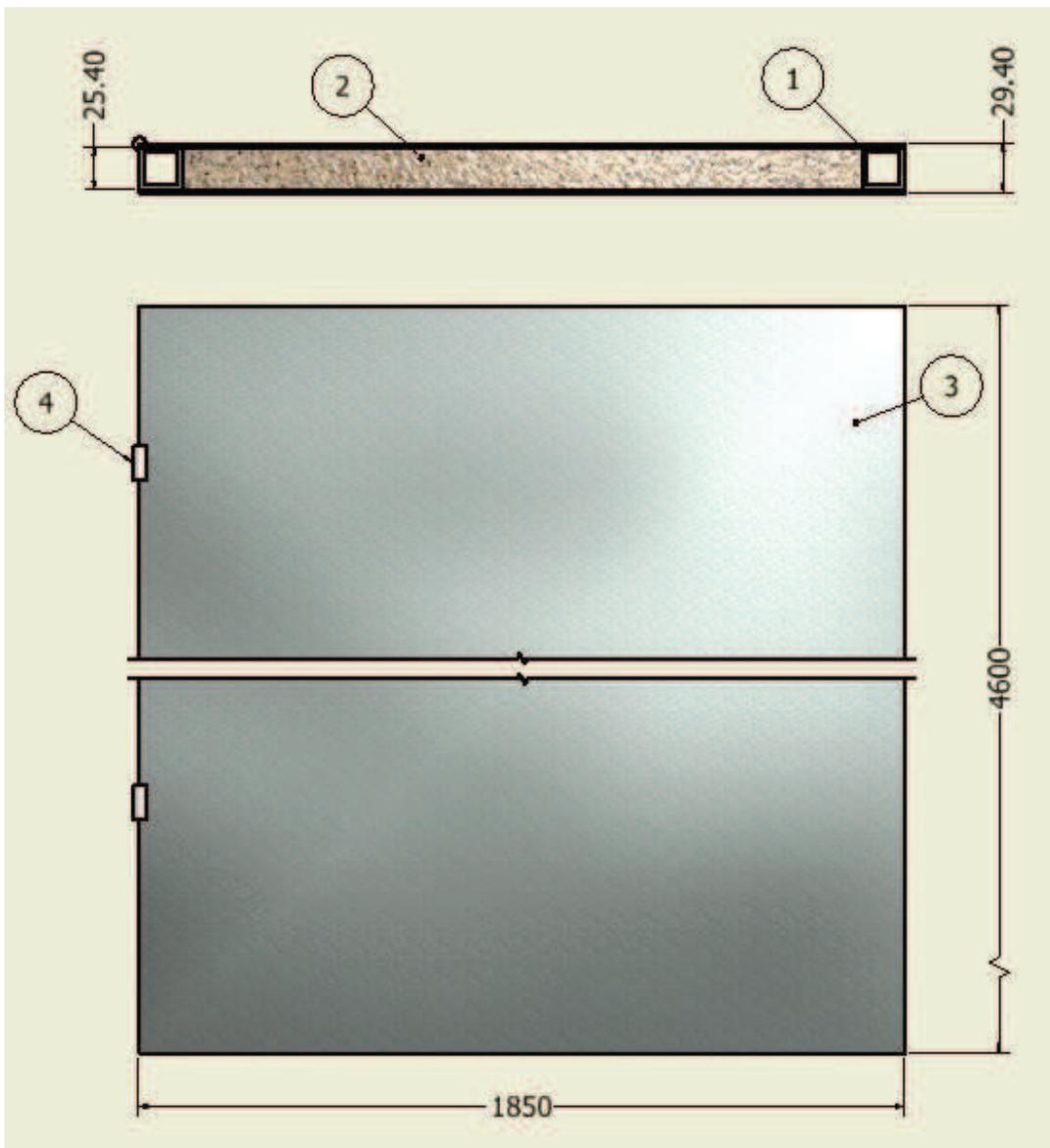


Figura 4. 12 Composición de las puertas (una hoja)

1. Tubo cuadrado
2. Lana de vidrio
3. Lámina de tol galvanizada
4. Bisagras

4.2.1.3 Dimensionamiento del aislante de las puertas del horno

Para el dimensionamiento del aislante de las puertas se debe considerar que las pérdidas de calor en las puertas sean menores o iguales que las pérdidas de calor

de las paredes, ya que sería inútil tener menores pérdidas de calor en las puertas, si en las paredes se tendrá grandes pérdidas de calor en comparación al de la puerta.

Por lo tanto se procede a calcular e igualar el calor que se pierde en las puertas con el calor que se pierde en las paredes del horno en una unidad de área para después calcular el espesor del aislante en la puerta.

La pérdida de calor a través de la puerta se puede calcular de la siguiente manera:

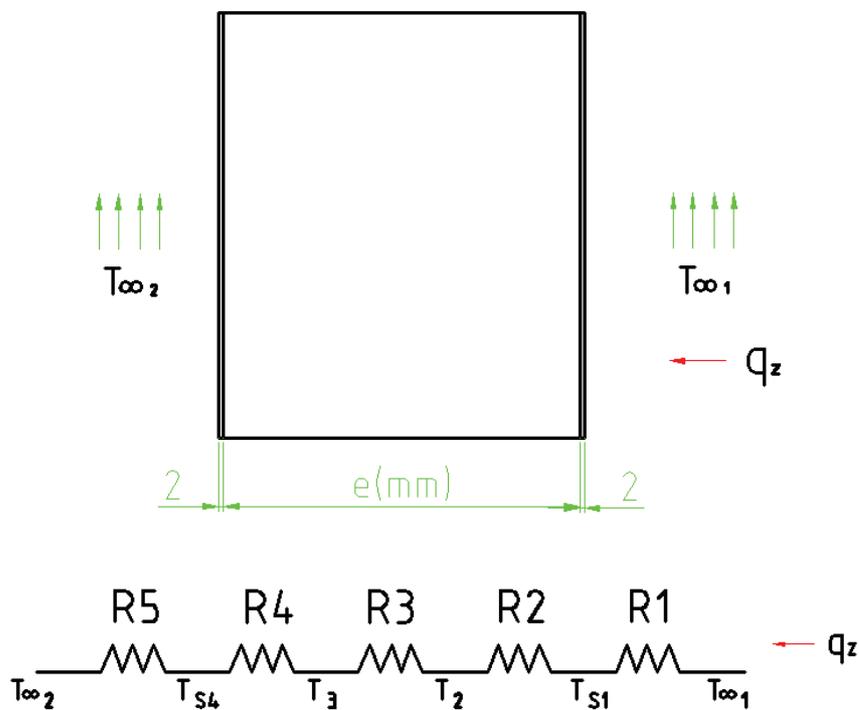


Figura 4. 13 Resistencia térmica de la puerta

$$q_{p.puertas} = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{[(R5) + (R4) + (R3) + (R2) + (R1)]} \quad \text{Ec. (4. 1)}$$

$$q_{p.puertas} = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{\left(\frac{1}{h_1 * A} + \frac{l_2}{K_2 * A} + \frac{l_3}{K_3 * A} + \frac{l_4}{K_4 * A} + \frac{1}{h_2 * A}\right)}$$

Dónde:

$T_{\infty 1}$: Temperatura del fluido caliente (K)

$T_{\infty 2}$: Temperatura del fluido frio (K)

l_n : Espesor de la pared (m)

K_n : Conductividad térmica de pared ($W/m * K$)

h_n : Coeficiente convectivo fluido frio o caliente ($W/m^2 * K$)

Las resistencias térmicas de las láminas de acero galvanizado (R2 y R4) son aproximadamente cero por lo que se las desprecian, como se desconocen los coeficientes de convección interno y externo estos se los deja expresado como h_1 , h_2 y $T_{\infty 1} - T_{\infty 5}$, y para un área unitaria, se teniendo como variable el espesor de la pared de lana de vidrio, cuya conductividad térmica es 0.038 ($W/m * K$).

$$q_{p.puertas} = \frac{(T_{\infty 1} - T_{\infty 2})K}{\left(\frac{1}{h_1 * 1} + 0 + \frac{e}{0.038 * 1} + 0 + \frac{1}{h_2 * 1}\right) K/W}$$

La pérdida de calor a través de las paredes se puede calcular de la siguiente manera:

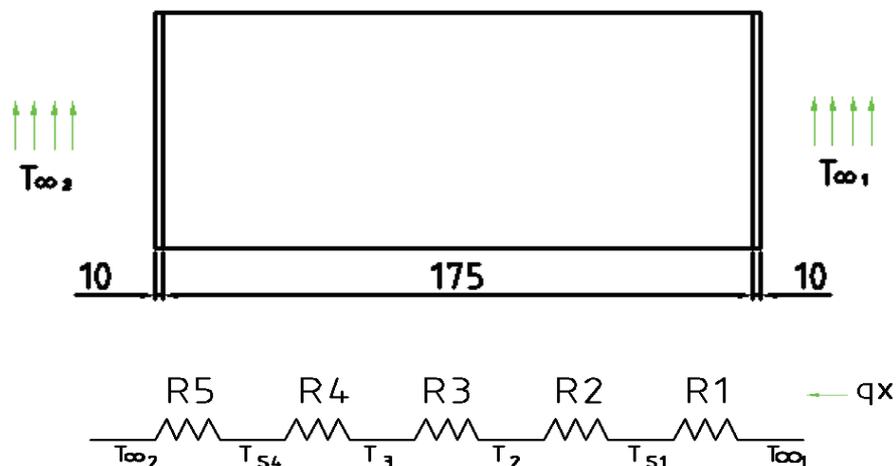


Figura 4. 14 Circuito térmico equivalente para la pared lateral compuesta del horno

$$q_{p.pared} = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{[(R_5) + (R_4) + (R_3) + (R_2) + (R_1)]} \quad \text{Ec. (4. 2)}$$

$$q_{p.pared} = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{\left[\left(\frac{1}{h_2 * A}\right) + \left(\frac{l_4}{K_4 * A}\right) + \left(\frac{l_3}{K_3 * A}\right) + \left(\frac{l_2}{K_2 * A}\right) + \left(\frac{1}{h_1 * A}\right)\right]}$$

Dónde:

$T_{\infty 1}$: Temperatura del aire caliente (K)

$T_{\infty 2}$: Temperatura del aire frío (K)

l_n : Espesor de la pared (m)

K_n : Conductividad térmica de cada espesor de pared ($W/m * K$)

h_n : Coeficiente convectivo fluido frío o caliente ($W/m^2 * K$)

$$q_{p.pared} = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{\left[\left(\frac{1}{h_2 * A} \right) + \left(\frac{2E-03}{0.72 * 1} \right) + \left(\frac{0.175}{0.72 * A} \right) + \left(\frac{2E-03}{0.72 * A} \right) + \left(\frac{1}{h_1 * A} \right) \right]}$$

Igualando tenemos:

$$q_{p.uerta} = q_{p.pared}$$

$$\frac{(T_{\infty 1} - T_{\infty 2})}{\left(\frac{1}{h_1 * 1} + 0 + \frac{e}{0.038 * 1} + 0 + \frac{1}{h_2 * 1} \right) K/W} = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{\left[\left(\frac{1}{h_2 * 1} \right) + \left(\frac{2E-03}{0.72 * 1} \right) + \left(\frac{0.175}{0.72 * 1} \right) + \left(\frac{2E-03}{0.72 * 1} \right) + \left(\frac{1}{h_1 * 1} \right) \right]}$$

$$e = 9.5E - 03 \text{ (m)} \approx 1 \text{ cm}$$

Por lo tanto el espesor mínimo del aislante para tener similares pérdidas de calor entre la puerta y las paredes es de 1 cm. Debido a que las presentaciones más comunes de los rollos de lana de vidrio varían de 1 pulgada en adelante se escoge el espesor de una pulgada, por lo cual la puerta será construida de acuerdo con experiencias de constructores con perfiles cuadrados galvanizados, de 1 pulgada los cuales son encontrados en el mercado nacional, a los que se les colocara las planchas de tol galvanizado de 2(mm) de espesor tanto en el interior como en el exterior como se muestra en plano 3.3059.102 del Anexo 3.

4.2.1.4. Cielo falso

Los paneles del cielo falso estarán conformados por planchas de tol galvanizado de 2(mm) de espesor en el interior y de 1(mm) en el exterior con, tubo estructural

cuadrado de 1 pulgada y lana de vidrio composición similar al de las puertas conformando así los paneles del cielo falso, ya que las características de este son similares a la de las puertas y además deben tener la capacidad de soportar los equipos como el caso de los ventiladores como se muestra en el plano 3.3059.103 del Anexo 3. El cielo contará con una inclinación de 2%, para facilitar la salida del agua o el condensado que se produce por efecto del proceso de secado de la madera.

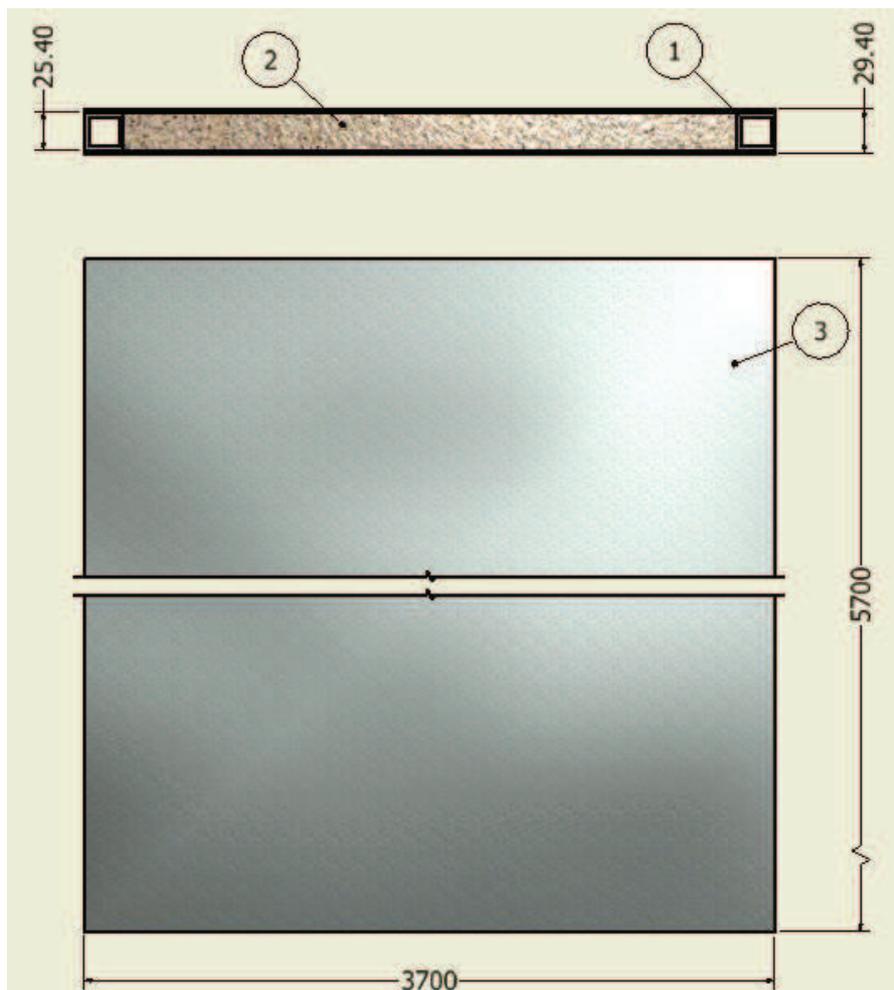


Figura 4. 15 Esquema de la composición del cielo falso

1. Tubo cuadrado
2. Manta de lana de vidrio
3. Tol galvanizado

4.3. DIMENSIONES FINALES DE LA CÁMARA DE SECADO

Para tener el alto final del horno se debe adicionar el alto que ocuparán los ventiladores, además el espesor de la losa según el Código Ecuatoriano de la Construcción establece que la altura de las losa no debe ser menor a 0.12 m por lo que se escoge el valor de 0.14 m.⁵¹

Tabla 4. 4 Dimensiones internas del horno

Descripción	Dimensiones (m)		Espesor pared (m)	
	Largo	Alto con cielo falso	Mortero interior	Mampostería
Pared lateral 1	6.7	4.6	0.01	0.175
Pared lateral 2	6.7	4.6	0.01	0.175
Tipo	Ancho	Alto	Mortero interior	Mampostería
Pared posterior 3	4.09	4.6	0.01	0.175
Tipo	Largo	Ancho	Loseta	Volumen
Techo	6.924	4.09	0.14	3.96

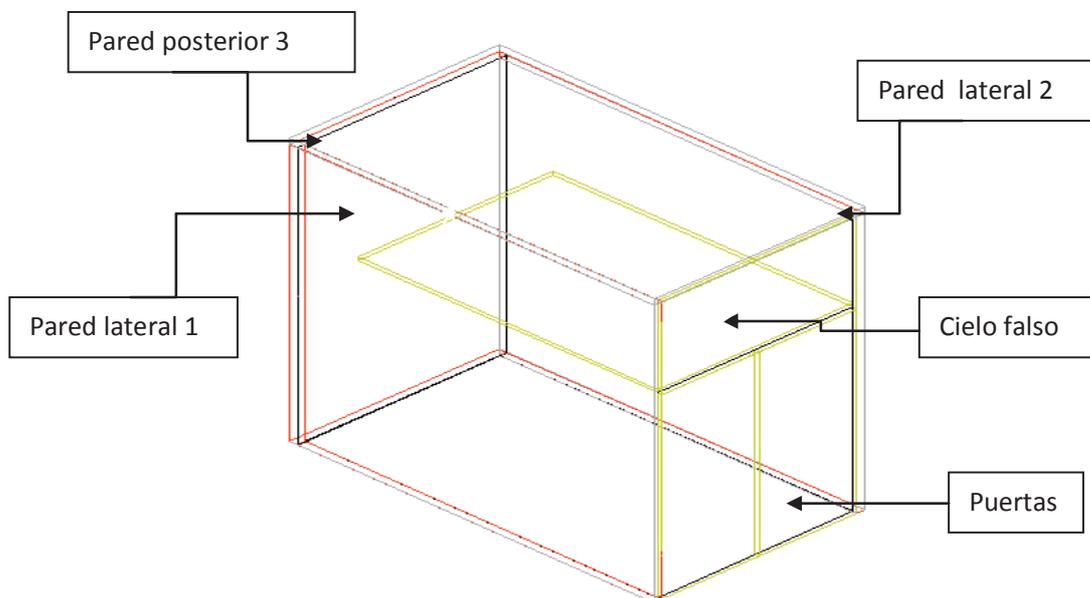


Figura 4. 16 Esquema de las paredes del horno

⁵¹<http://publiespe.espe.edu.ec/academicas/hormigon/hormigon07-b.htm>

Tabla 4. 5 Dimensiones externas del horno

Descripción	Dimensiones (m)		Espesor pared
Tipo	Largo	Alto	Mortero exterior
Pared lateral 1	6.729	4.6	0.01
Pared lateral 2	6.729	4.6	0.01
Tipo	Ancho	Alto	Mortero exterior
Pared posterior 3	4.09	4.6	0.01

Tabla 4. 6 Dimensiones del techo falso

Descripción	Longitud	Ancho	Espesor
Cielo falso	(m)		
Dimensiones del aislante	3.696	5.696	0.0254
Dimensiones de las laminas	3.7	5.7	0.002
	3.7	5.7	0.002

Tabla 4. 7 Dimensiones de las puertas del horno

Descripción	Longitud	Ancho	Espesor
Puertas	(m)		
Aislante	4.596	3.696	0.0254
Dimensiones de las laminas	4.6	3.7	0.002
	4.6	3.7	0.002

Espesor de la pared de tol galvanizado 2mm

4.3.1. OBRA CIVIL⁵²

A continuación se presentaran las descripciones y especificaciones técnicas de las obras civiles de la cámara de secado, identificando cada aspecto constructivo del proyecto, se deja en claro que las especificaciones corresponden a recomendaciones.

- Las dimensiones del piso del horno son de 7x4x0.2 m debido a que se aumentó el ancho del ladrillo y el enlucido, el espesor del piso es de 0.2 m debido a que tiene que soportar el peso de la pila de madera, el piso esta hecho de concreto armado.
- Se debe considerar la puesta de plintos en las esquinas a 3.5 m en los laterales para la ubicación de las columnas ya que el espaciamiento entre columnas de confinamiento debe ser menor o igual a 4 m.
- Las columnas y vigas de confinamiento se deben construir utilizando hormigón cuya resistencia mínima a la compresión debe ser 21MPa medida a los 28 días.
- Las columnas y vigas de confinamiento se deben construir utilizando acero de refuerzo longitudinal corrugado y podrán ser también de armadura electro-soldada.
- Para mayor detalle de las obras civiles observar el plano 3.3059.101 del Anexo 3.

4.4. DISEÑO TÉRMICO DEL HORNO PARA SECADO DE MADERA

4.4.1. PARÁMETROS DE DISEÑO

Los parámetros de diseño son factores que se mantendrán durante toda la operación del horno.

⁵²<http://www.normaconstruccion.ec/index.php/using-joomla/extensions/components/content-component/article-categories/75-actualizacion-de-los-capitulos-de-la-norma-ecuatoriana-de-construccion-nec>

- **Madera**

Volumen a secar es de 23 m³(700 tablones)

Contenido de humedad en verde 80 %

Contenido de humedad final 12 %

Densidad 750 $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$ ⁵³

- **Aire en el horno**

Temperatura de funcionamiento 43.5 °C

Velocidad del aire interno 1.2 m/s

- **Aire externo a condiciones ambientales de Quito**⁵⁴

Temperatura media anual 13.8° C ≈ 14 °C

Humedad media anual 72.6 %

Velocidad del viento media anual 7.3 Km/h=2.02 m/s

4.4.2. FLUJO DE CALOR PARA CALENTAMIENTO DE LA MADERA HÚMEDA

Para el secado de la madera en el interior del horno se debe calentar todos los materiales hasta la temperatura de funcionamiento del horno, para esto se debe suministrar calor de un sistema de calefacción.

Como no existe un cambio de fase de la madera entonces solo se considera el calor sensible **Ecuación 3.1.**

$$\dot{Q}_{cal} = \frac{V * \rho * Cp * (T_{ave} - T_a)}{\Delta t}$$

⁵³<http://www.jossoft.com.ar/ARCHIVOS/Pesos%20Especificos.pdf>

⁵⁴http://www.tutiempo.net/clima/Quito_Mariscal_Sucre/2011/840710.htm

Para proceder al cálculo de este calor primero se calcula el valor del volumen neto de madera que ingresa al horno.

Considerando las dimensiones de cada tablón se tiene

$$V_{mt} = (0.25 * 0.05 * 2.5)m^3 = 0.0312 \frac{m^3}{\text{tablón}}$$

$$V_m = 0.0312 \frac{m^3}{\text{tablón}} * 720 \text{ tablones} = 22.46 m^3$$

Como segundo paso, utilizando la ecuación 3.4 se debe calcular el calor específico para madera seca el cual está en función de la temperatura, por lo tanto se debe trabajar con un valor promedio de c_p , calculado para la temperatura ambiente y la de iniciación del horno.

$$c_{p_o} = 0.1031 + 0.3867 * 10^{-2} * (43.5 + 273)$$

$$c_{p_o} = 1.327 \left(\frac{KJ}{Kg - K} \right)$$

Tabla 4. 8 Calor específico de la madera

Temperatura	Cp	Cp medio
°C	$\left(\frac{KJ}{Kg - K} \right)$	$\left(\frac{KJ}{Kg - K} \right)$
43.5	1.327	1.27
14	1.213	

Una vez obtenido el valor del c_p para madera seca, se calcula el calor específico de la madera húmeda para lo cual se utiliza la **Ecuación 3.5**.

$$c_{p_m} = \frac{(c_{p_o} + 0.01 * C.H * c_{p_w})}{(1 + 0.01 * C.H)} + A_c$$

$$c_{p_m} = \frac{(1.27 + 0.01 * 80 * 4.19)}{(1 + 0.01 * 80)} + 0$$

$$c_{p_m} = 2.56 \left(\frac{KJ}{Kg - K} \right)$$

Usando la **Ecuación 3.3** de calentamiento de la madera y los cálculos realizados anteriormente se tiene:

$$\dot{Q}_{Ma} = \frac{22.46 \text{ m}^3 * 750 \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}\right) * 2.56 \left(\frac{\text{KJ}}{\text{Kg-K}}\right) * (316.5 - 287)(K)}{21240 \text{ s}}$$

$$\dot{Q}_{Ma} = 59.9 \text{ KW}$$

4.4.3. FLUJO DE CALOR PARA CALENTAMIENTO DE LOS ESPACIADORES⁵⁵

Los tipos de madera más utilizados para los espaciadores son de coníferas ya que estas no se deforman con el calor y tampoco segregan sustancias que pueden manchar la madera que se está secando, la madera conífera más utilizada para el secado es el pino.⁵⁶

Los espaciadores de pino deben tener con un contenido de humedad del 10% para evitar que exista variaciones de dimensiones durante el secado por lo tanto se toma el dato de densidad en seco.

$$\rho_{pino} = 480 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}\right]$$

Para calcular la el volumen de los espaciadores se utiliza la siguiente ecuación:

$$V_e = l * a * e \quad \text{Ec. (4. 3)}$$

Dónde:

V_e : Volumen de cada espaciador (m^3)

l : Largo del espaciador (m)

a : Ancho del espaciador (m)

e : Espesor del espaciador (m)

$$V_e = (0.03 * 0.03 * 1.1) = 9.9E - 4 \frac{\text{m}^3}{\text{espaciador}}$$

⁵⁵VISCARRA SILVERIO (1998). *Guía práctica para el secado de madera en hornos*, pág. 4.

⁵⁶PEDRAS FRANCISCO. *Secado de la madera: Recomendaciones prácticas*, revista Cis Madera. Págs. 49-50

$$V_e = 9.9E - 4 \frac{m^3}{\text{espaciador}} * 700 \text{ espaciadores} = 0.693 m^3$$

Usando la ecuación 3.3 de calentamiento de la madera y los cálculos realizados anteriormente se tiene:

$$\dot{Q}_{Es} = \frac{0.693 m^3 * 480 \left(\frac{Kg}{m^3}\right) * 1.27 \left(\frac{KJ}{Kg-K}\right) * (316.5 - 287)K}{21240 s}$$

$$\dot{Q}_{Es} = 0.587 KW$$

4.4.4. CALENTAMIENTO DEL AIRE QUE SE ENCUENTRA EN EL INTERIOR DEL HORNO

Cuando el horno inicia su operación, este se encuentra lleno de aire atmosférico y se debe utilizar calor de un sistema de calefacción para elevar su temperatura desde la temperatura ambiental hasta la de operación. Para procesos de acondicionamiento de aire es necesario tratar al aire como una mezcla de vapor de agua y aire seco por lo cual en calor necesario para calentar el aire se calcula con ayuda de la siguiente ecuación:⁵⁷

$$\dot{Q}_{CA} = \frac{m*(h_2-h_1)}{\Delta t} \quad \text{Ec. (4. 4)}$$

Dónde:

\dot{Q}_{CA} : Calor para calentamiento el aire del horno (KW)

m : Masa de aire en el interior del horno (Kg)

h_2 : Entalpia especifica al final del calentamiento (KJ/Kg)

h_1 : Entalpia especifica inicial del calentamiento (KJ/Kg)

Δt : Tiempo de calentamiento (s)

⁵⁷Y. CENGEL, M. BOLES, (2002); *Termodinámica*. México-México DF, McGraw-Hill, pág. 733

Para calcular la masa de aire interna es necesario conocer el volumen de aire que hay en el interior del horno para lo cual se utiliza la siguiente ecuación:

$$V_{ia} = V_{IH} - V_{nM} \quad \text{Ec. (4. 5)}$$

Dónde:

V_{ia} : Volumen interno de aire

V_{IH} : Volumen interno del horno

V_{nM} : Volumen neto de la madera apilada y espaciadores

$$V_{ia} = (3.7 * 6.7 * 4.6)m^3 - 22.46m^3 - 0.693 m^3$$

$$V_{ia} = 90.9 m^3 \text{ de aire}$$

Propiedades del aire a la entrada del horno:

$$T_{air_0} = 14 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$P_{at} = 10.4 \text{ psia}$$

$$\phi_e = 73 \%$$

T_{air_0} Temperatura inicial del aire

P_{at} Presión atmosférica

ϕ_e Humedad relativa a la entrada

Usando la carta psicométrica

$$\text{Entalpia especifica} = \frac{21 \text{ Btu}}{\text{lbm de aire seco}} = \frac{48.846 \text{ KJ}}{\text{Kg de aire seco}}$$

Humedad específica a las condiciones de entrada:

$$\omega_0 = \frac{0.622 * P_v}{P - P_v} \quad \text{Ec. (4. 6)}$$

$$P_v = \phi_e * P_g$$

Dónde:

ω_o : Humedad específica a las condiciones de entrada ($Kg_{vapor\ de\ agua}/Kg_{aire}$)

P : Presión total, atmosférica (KPa)

P_v : Presión parcial del vapor de agua (KPa)

P_g : Presión saturación del agua a la temperatura del aire (KPa)

ϕ_e : Humedad relativa a la entrada (%)

$$P_v = \phi * P_{sat@14^\circ C}$$

$$P_v = 0.73 * 1.6102\ KPa$$

$$P_v = 1.175\ KPa$$

$$\omega_o = \frac{0.622 * 1.175\ KPa}{71.72\ KPa - 1.175\ KPa}$$

$$\omega_o = 0.01036 \frac{Kg_{vapor\ de\ agua}}{Kg_{aire}}$$

Propiedades del aire después del calentamiento

$$T_{airf} = 43.5\ ^\circ C$$

$$P_{at} = 10.4\ psia$$

T_{airf} : Temperatura de operación del horno

P_{at} : Presión atmosférica

A estas condiciones se debe encontrar una nueva humedad relativa debida al calentamiento del aire.

La humedad específica del aire (ω_o) no varía y es la misma que se tiene a las condiciones de entrada del horno debido a que no se produce la humidificación de la misma.

$$\phi_s = \frac{\omega_o * P}{(0.622 + \omega_o) * P_{sat@43.5^\circ C}} \quad \text{Ec. (4. 7)}$$

Dónde:

ϕ_s : Humedad relativa a la salida (%)

ω_o : Humedad específica a las condiciones de entrada ($Kg_{vapor\ de\ agua}/Kg_{aire}$)

P : Presión total, atmosférica (KPa)

P_g : Presión saturación del agua a la temperatura del aire (KPa)

$$\phi = \frac{0.01036 * 71.72\ KPa}{(0.622 + 0.01036) * 8.93\ KPa}$$

$$\phi \approx 15\%$$

Usando la carta psicométrica

$$Entalpia\ especifica = \frac{37\ Btu}{lbm\ de\ aire\ seco} = \frac{86.1\ KJ}{Kg\ de\ aire\ seco}$$

Usando la ecuación para gases ideales se calcula la masa de aire en el interior del horno⁵⁸

$$m = \frac{PV}{\bar{R}T} \quad \text{Ec. (4. 8)}$$

Dónde:

m : Masa del gas (Kg)

\bar{R} : Constante del gas [$KJ/(Kg - K)$]

T : Temperatura promedio del gas (K)

P : Presión a la que se encuentra gas (KPa)

V : Volumen ocupado por el gas (m^3)

⁵⁸Y. CENGEL, M. BOLES, (2002); *Termodinámica*. México-México DF, McGraw-Hill

$$m = \frac{71.72 \text{ (KPa)} * 90.94 \text{ (m}^3\text{)}}{0.2870 \left(\frac{\text{KJ}}{\text{kg-K}}\right) * 316.5 \text{ (K)}}$$

$$m = 71.8 \text{ Kg}$$

Se utiliza la ecuación 4.4 para calcular el calor necesario para calentar el aire

$$Q_{CA} = \frac{71.8 \text{ (Kg)} * (104.67 - 48.85) \left(\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}\right)}{21240 \text{ s}}$$

$$Q_{CA} = 0.126 \text{ [KW]}$$

4.4.5. CALENTAMIENTO DE LA ESTRUCTURA DEL HORNO⁵⁹

El cálculo del calor necesario para calentar las paredes se la realizara para cada espesor de cada material que compone la estructura y se utilizaran los volúmenes físicos y densidades que son fáciles de encontrar.

$$\dot{Q}_E = \dot{Q}_{Moi} + \dot{Q}_{Mam} + \dot{Q}_{Moe} + \dot{Q}_{Te} + \dot{Q}_{Cf} + \dot{Q}_{Pu} \quad \text{Ec. (4. 9)}$$

Dónde:

\dot{Q}_E : Calor para calentar la estructura (W)

\dot{Q}_{Moi} : Calor para calentar la pared interior de mortero(W)

\dot{Q}_{Mam} : Calor para calentar la pared de mampostería(W)

\dot{Q}_{Moe} : Calor para calentar la pared exterior de mortero (W)

\dot{Q}_{Te} : Calor para calentar el techo del horno(W)

\dot{Q}_{Cf} : Calor para calentar el cielo falso del horno(W)

\dot{Q}_{Pu} : Calor para calentar las puertas del horno(W)

⁵⁹ F. INCROPERA, D. DEWITT, (1999), *Fundamentos de transferencia de calor*, México, Prentice Hall, Propiedades de los materiales, densidad, cp., conductividad tabulados en los apéndices.

Se utiliza la siguiente ecuación para calcular el volumen de las paredes

$$V = l * a * e \quad \text{Ec. (4. 10)}$$

Dónde:

V : Volumen (m^3)

l : Longitud de la pared (m)

a : Ancho de la pared (m)

e : Espesor de la pared(m)

Ejemplo de cálculo volumen del recubrimiento de mortero interno

$$V = (6.729 * 4.6 * 0.01)[m^3] + (6.729 * 4.6 * 0.01)[m^3] + (3.7 * 4.6 * 0.01)[m^3]$$

$$V = 0.789m^3$$

El volumen neto será la suma de la cantidad de material usado en todas las paredes.

Calculo de temperatura interna la que se encuentran los materiales que constituye la estructura del horno

Como los materiales que componen el horno están en contacto tanto con el aire atmosférico que está a una temperatura de 14 °C como con el aire caliente que esta a una temperatura de 43.5 °C, se suponen que estos materiales alcanzan una temperatura promedio T_{ave} que se calcula de la siguiente manera:

$$T_{ave} = \frac{(316.5 + 287)K}{2}$$

$$T_{ave} = 301.75 K$$

Calor para calentar la pared interior de mortero

Para todos los materiales a calentar se utilizara la **Ecuación 3.3** de calentamiento de materiales.

$$\dot{Q}_{Moi} = \frac{0.789 \text{ m}^3 * 1860 \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}\right) * 0.78 \left(\frac{\text{KJ}}{\text{Kg-K}}\right) * (301.75 - 287)K}{21240 \text{ s}}$$

$$\dot{Q}_{Moi} = 0.795 \text{ KW}$$

Calor para calentar la pared de mampostería

$$\dot{Q}_{Mam} = \frac{13.81 \text{ m}^3 * 1920 \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}\right) * 0.835 \left(\frac{\text{KJ}}{\text{Kg-K}}\right) * (301.75 - 287)K}{21240 \text{ s}}$$

$$\dot{Q}_M = 15.37 \text{ KW}$$

Calor para calentar la pared exterior de mortero

$$\dot{Q}_{Moe} = \frac{0.81 \text{ m}^3 * 1860 \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}\right) * 0.78 \left(\frac{\text{KJ}}{\text{Kg-K}}\right) * (301.75 - 287)K}{21240 \text{ s}}$$

$$\dot{Q}_{Moe} = 0.81 \text{ KW}$$

Calor para calentar el techo del horno

El techo del horno está compuesto de bloque y hormigón armado cuya conductividad es similar al de la mampostería y el espesor recomendado es 0.14 m.

$$\dot{Q}_{Te} = \frac{5.66 (\text{m}^3) * 1400 \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}\right) * 1.05 \left(\frac{\text{KJ}}{\text{Kg-K}}\right) * (301.75 - 287)K}{21240 \text{ s}}$$

$$\dot{Q}_{Hm} = 4.05 \text{ KW}$$

Calor para calentar el cielo falso del horno

$$\dot{Q}_{cf} = \dot{Q}_{Tg} + \dot{Q}_{Lv} \quad \text{Ec. (4. 11)}$$

Dónde:

\dot{Q}_{cf} : Calor para calentar el cielo falso (KW)

\dot{Q}_{Tg} : Calor para calentar las láminas de tool galvanizado (KW)

\dot{Q}_{Lv} : Calor para calentar la manta de lana de vidrio (KW)

$$\dot{Q}_{Tg} = \frac{0.1983 (m^3) * 7850 \left(\frac{Kg}{m^3}\right) * 0.45 \left(\frac{KJ}{Kg-K}\right) * (301.75 - 287)K}{21240 s}$$

$$\dot{Q}_{Tg} = 0.487 KW$$

$$\dot{Q}_{Lv} = \frac{0.63 (m^3) * 32 \left(\frac{Kg}{m^3}\right) * 0.835 \left(\frac{KJ}{Kg-K}\right) * (301.75 - 287)K}{21240 s}$$

$$\dot{Q}_{Lv} = 0.0117 KW$$

$$\dot{Q}_{Cf} = 0.487 + 0.0117 = 0.498 KW$$

Calor para calentamiento de las puertas del horno

$$\dot{Q}_P = \dot{Q}_{Tg} + \dot{Q}_{Lv}$$

$$\dot{Q}_{Tg} = \frac{0.068(m^3) * 2700 \left(\frac{Kg}{m^3}\right) * 0.434 \left(\frac{KJ}{Kg-K}\right) * (301.75 - 287)K}{21240 s}$$

$$\dot{Q}_{Tg} = 0.167KW$$

$$\dot{Q}_{Lv} = \frac{0.43(m^3) * 70 \left(\frac{Kg}{m^3}\right) * 0.835 \left(\frac{KJ}{Kg-K}\right) * (301.75 - 287)K}{21240 s}$$

$$\dot{Q}_{Lv} = 0.008 KW$$

$$\dot{Q}_P = 0.167 + 0.008 = 0.175 KW$$

4.5. CALOR PARA EVAPORAR EL AGUA DE LA MADERA EN LA ETAPA DE SECADO

4.5.1. PESO ANHÍDRIDO DE LA MADERA

Para determinar la cantidad de agua que se debe eliminar de la madera es necesario primero determinar la masa de madera anhidrida (peso en seco), para esto se usará la **Ecuación 2.3**.

$$C.H = \frac{P.V - P.S}{P.S} * 100$$

$$\frac{C.H * P.S}{100} = P.V - P.S$$

$$P.S \left(\frac{C.H}{100} + 1 \right) = P.V$$

$$P.S = \frac{100 * P.V}{C.H + 100}$$

Dónde:

P.S : Peso de la madera en seco o anhidrido (Kg)

P.V : Peso de la madera verde (Kg)

C.H : Contenido de humedad (%)

$$P.S = \frac{100[\%] * 23m^3 * 750 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]}{(80 + 100)[\%]}$$

$$P.S = 9583.33 Kg$$

4.5.1.1. Masa de agua a eliminar

Con el peso en seco y usando la misma **Ecuación 2.3** se puede determinar la masa de madera para varios casos de contenido de humedad, por diferencia se puede encontrar la masa de agua contenida.

$$P.V = \frac{C.H * P.S}{100} + P.S$$

$$m_{1H_2O} = P.V_{80\%} - P.V_{30\%} \quad \text{Ec. (4. 12)}$$

$$m_{2H_2O} = P.V_{30\%} - P.V_{12\%} \quad \text{Ec. (4. 13)}$$

Dónde:

$P.V_{80\%}$: Peso de la madera con un contenido de humedad del 80% (Kg)

$P.V_{30\%}$: Peso de la madera con un contenido de humedad del 30% (Kg)

$P.V_{12\%}$: Peso de la madera con un contenido de humedad del 30% (Kg)

m_{1H_2O} : Masa de agua a evaporar desde un contenido de humedad del 80 a 30% (Kg)

m_{2H_2O} : Masa de agua a evaporar desde un contenido de humedad del 30 a 12% (Kg)

Tabla 4. 9 Masa de agua a retirar

C.H	P.V	P.S	Masa de agua a retirar
%	Kg	Kg	Kg
80	17250	9583.33	-
30	12458.33		4791.67
12	10733.32		1724.99

4.5.1.2. Calor para evaporar el agua libre (etapa de 80% hasta 30% CH)

Con la masa de agua a evaporar y la temperatura a la que llega la madera se puede determinar las propiedades del agua.

$$q_{Ev1} = m_{1H_2O} * (h_{fg@43.5^\circ\text{C}}) \quad \text{Ec. (4. 14)}$$

Dónde:

q_{Ev1} : Calor necesario para evaporar el agua libre (KJ)

m_{1H_2O} : Masa de agua a retirar o agua libre (Kg)

$h_{fg@80^\circ C}$: Calor latente de vaporización del agua a 43.5 °C (KJ/Kg)

$$q_{Ev1} = 4791.67 (Kg) * 2289.6 \left(\frac{KJ}{Kg} \right)$$

$$q_{Ev1} = 10.97 * 10^6 KJ$$

4.5.1.3. Calor para evaporar el agua ligada(etapa de 30% hasta 12% CH)

$$q_{Ev2} = m_{2H_2O} * h_{fg@60^\circ C} + m_{2H_2O} * h_{ad}$$

Dónde:

q_{Ev2} : Calor necesario para evaporar el agua ligada (KJ)

m_{2H_2O} : Masa de agua ligada hasta el 12% de contenido de humedad (Kg)

$h_{fg@60^\circ C}$: Calor latente de vaporización del agua a 43.5 °C (KJ/Kg)

h_{ad} : Calor de adsorción adicional (KJ/Kg)

$$q_{Ev2} = 1724.99(Kg) * 2357.4 \left(\frac{KJ}{Kg} \right) + 1724.99(Kg) * 4600 \left(\frac{KJ}{Kg} \right)$$

$$q_{Ev2} = 12.* 10^6 (KJ)$$

4.5.2. TIEMPO DE SECADO

Para conocer el flujo de calor que se debe tener en el horno por etapas es necesario determinar el tiempo que toma cada etapa.

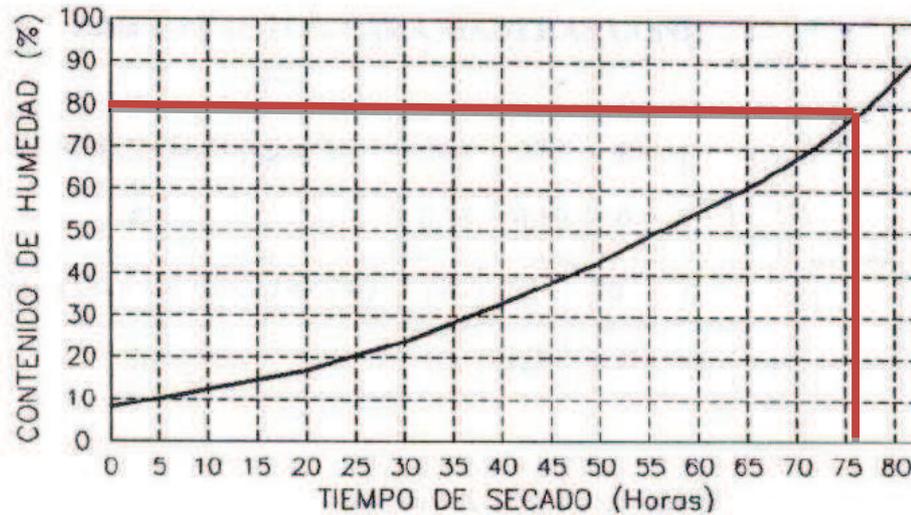


Figura 4. 17 Tiempo básico de secado para maderas frondosas

De acuerdo a la gráfica el tiempo de secado mínimo para una madera frondosa depende del contenido de humedad.

Ejemplo de cálculo de tiempo básico de secado

Tiempo de secado de un CH de 80% a 30% = 77 hr - 37 hr = 40 hr

4.5.2.1. Factores de corrección del tiempo de secado para maderas frondosas

Tabla 4. 10 Factor de corrección para tiempo de secado relacionado con el espesor.

Espesor (mm)	50	55	60	65
f1	2.83	3.28	3.72	4.2

Tabla 4. 11 Factor de corrección para tiempo de secado relacionado con la densidad

PESO ESPECIFICO (kg/m^3)	710	740	770
f2	1.1	1.12	1.2

Tabla 4. 12 Factor de corrección para tiempo de secado relacionado con la temperatura de secado

TEMPERATURA DE SECADO ($^{\circ}C$)	55	60	65
f3	1.7	1.5	1.3

Tabla 4. 13 Factor de corrección para tiempo de secado relacionado con la velocidad de secado

VELOCIDAD (m/s)	1.5	1.75	2
f4	1.19	1.08	1

Tabla 4. 14 Factor de corrección para tiempo de secado relacionado con el agua libre

f6	1.1	Tiempo de secado hasta PSF
----	-----	----------------------------

Tiempo de secado corregido de un CH de 80% a 30%

$$t_{sec80\%a\ 30\%} = 40 * 3.72 * 1.2 * 1.5 * 1.19 * 1.1 * 1 = 350.6\ hr$$

En el capítulo tres se elaboró el cronograma de secado con los diferentes tiempos que tiene cada etapa.

Tabla 4. 15 Tiempo de secado básico (hr)

Contenido de humedad	Tiempo básico de secado
80	77
50	56
40	47
35	42
30	36
25	32
20	25
15	16
12	11

Tabla 4. 16 Tiempo de secado corregido (hr)

Contenido de humedad	Tiempo que toma cada rango de humedad	Tiempo corregido
80-50	21	179.704
50-40	9	77.016
40-35	5	42.787
35-30	6	51.344
30-25	4	31.118
25-20	7	54.456
20-15	9	70.014
15-12	5	38.897

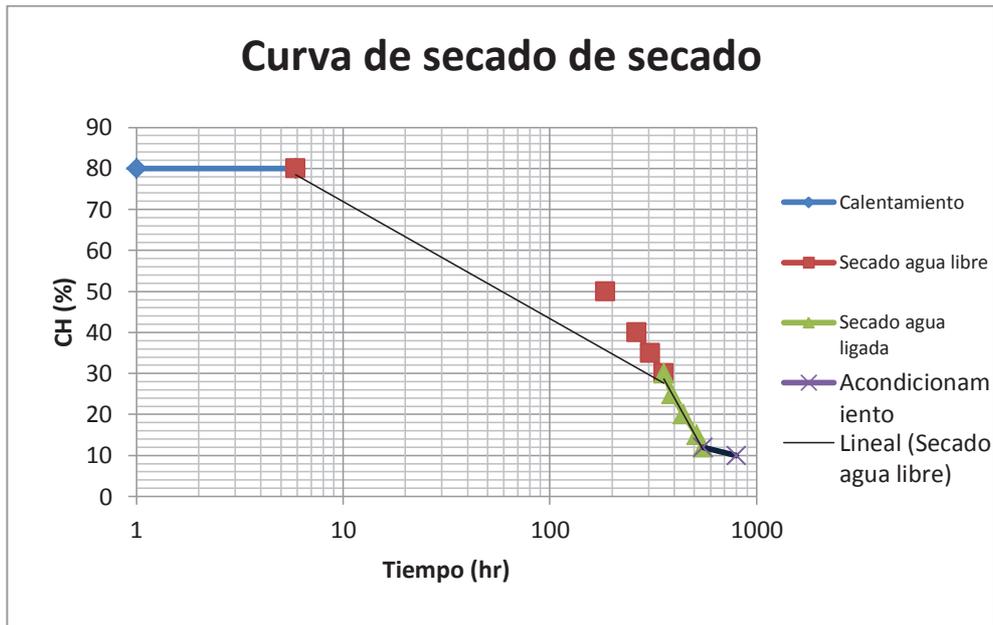


Figura 4. 18 Curva de secado que se utilizara en el horno

4.5.3. FLUJO DE CALOR PARA EVAPORAR EL AGUA

En la etapa de secado después del calentamiento va a tener un total de 25 días continuos se tiene que entregar la siguiente cantidad de calor para la eliminación del agua en la madera con ayuda de la siguiente ecuación:

$$\dot{Q} = \frac{q_{Ev}}{t_{sec}} \quad \text{Ec. (4. 15)}$$

Tabla 4. 17 Flujo de calor por etapas

	$q_{Ev}(KJ)$	$t_{sec}(s)$	$Q(KW)$
Etapas de 80% hasta 30% CH (agua libre)	$10.97 * 10^6$	$250.6 * 3600$	12.15
Etapas de 30% hasta 12% CH (agua ligada)	$12 * 10^6$	$138.91 * 3600$	23.99

4.5.4. FLUJO DE CALOR PERDIDO POR LAS PAREDES DE LA ESTRUCTURA

Las paredes del horno están compuestas de diferentes materiales con distintas conductividades térmicas, estos materiales presentan cierta resistencia al paso del calor pero esto no evita las pérdidas de calor.

4.5.5. ANÁLISIS DE RESISTENCIA TÉRMICA⁶⁰

4.5.5.1. Paredes laterales

Pared lateral 1, 2

$$q_x = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{[(R5)+(R4)+(R3)+(R2)+(R1)]} \quad \text{Ec. (4. 16)}$$

$$q_x = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{\left[\left(\frac{1}{h_5 * A} \right) + \left(\frac{l_4}{K_4 * A} \right) + \left(\frac{l_3}{K_3 * A} \right) + \left(\frac{l_2}{K_2 * A} \right) + \left(\frac{1}{h_1 * A} \right) \right]}$$

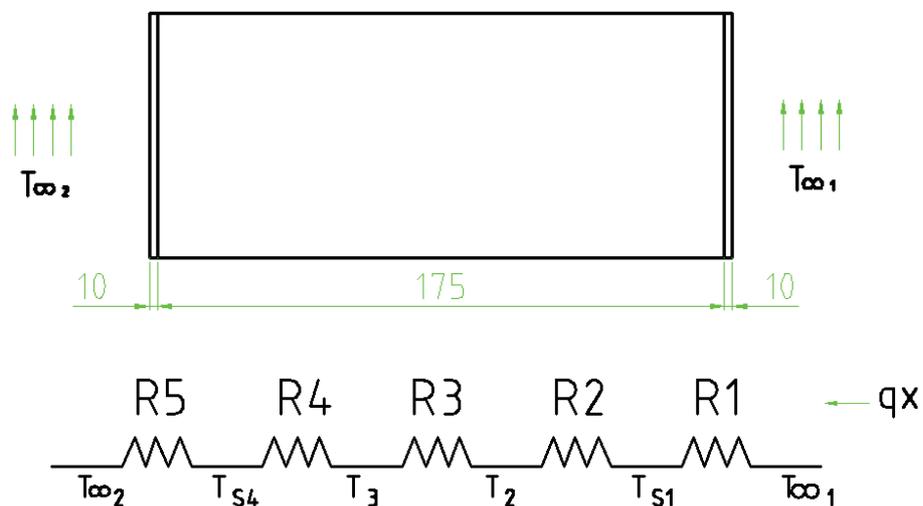


Figura 4. 19Circuito térmico equivalente para la pared lateral compuesta del horno

⁶⁰ F. INCROPERA, D. DEWITT, *Fundamentos de transferencia de calor*, México, Prentice Hall, 1999, Pág. 75.

Todos los datos son conocidos excepto los datos los coeficientes de convección para las paredes y la conductividad de la pared de mampostería ya que se trata de una pared compuesta entre ladrillo –mortero.

4.5.6. COEFICIENTE DE CONVECCIÓN DEL AIRE EXTERIOR

El coeficiente de convección que se va a calcular depende de la temperatura a la que se encuentre el aire 14°C, todos los datos geográficos y meteorológicos de esta ciudad se los puede encontrar como valores promedios.

Con datos tabulados se tiene que el aire externo presenta una velocidad promedio de 7.3 Km/hr y esto conlleva a suponer que se trata de un caso de convección forzada donde intervienen los parámetros a dimensionales dependientes de las propiedades del aire, para esto se presentan los siguientes datos.⁶¹

$$T_{e\ aire} = 14^{\circ}\text{C}$$

$$V_{(av\ aire)} = 7.3\ \text{Km/hr} = 2.03\ \text{m/s}$$

4.5.6.1. Parámetros adimensionales del aire exterior

4.5.6.1.1. Número de Reynolds⁶²

$$R_{eL} = \frac{u_{\infty} * L}{\gamma} \quad \text{Ec. (4. 17)}$$

Dónde:

R_{eL} : Número de Reynolds (–)

u_{∞} : Velocidad promedio del aire(m/s)

L : Longitud característica de la placa (m)

γ : Viscosidad cinemática (m²/s)

⁶¹http://www.tutiempo.net/clima/Quito_Mariscal_Sucre/2011/840710.htm

⁶² F. INCROPERA, D. DEWITT, Fundamentos de transferencia de calor, México, Prentice Hall, 1999, Pág. 312.

4.5.6.1.2. Número de Prandtl⁶³

$$Pr = \frac{\gamma}{\alpha} \quad \text{Ec. (4. 18)}$$

Dónde:

Pr : Número de Prandtl(–)

γ : Viscosidad cinemática (m^2/s)

α : Difusividad térmica (m^2/s)

Las propiedades del aire deben ser evaluadas a temperatura fílmica.

4.5.6.2. Cálculo del coeficiente de convección promedio del aire exterior

Como se desconoce la temperatura de la superficie se tendrá que hacer un procedimiento de suposiciones hasta llegar a una temperatura que satisfaga nuestros parámetros.

$$T_{f5} = \frac{T_{\infty 5} + T_{S5}}{2} \quad \text{Ec. (4. 19)}$$

Dónde:

T_{f5} : Temperatura de la capa límite del aire(K)

$T_{\infty 5}$: Temperatura promedio del aire exterior(K)

T_{S5} : Temperatura de la superficie de la pared exterior (K)

Suposición inicial

$$T_{S5} = 20 \text{ °C}$$

$$T_{f5} = \frac{14 + 20}{2}$$

⁶³ F. INCROPERA, D. DEWITT, *Fundamentos de transferencia de calor*, México, Prentice Hall, 1999, Pág. 312.

$$T_{f5} = 17 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Propiedades evaluadas a esta temperatura⁶⁴

Tabla 4.18 Propiedades del aire a 290 K

T_{f5}	$\gamma * 10^{-6}$	$\alpha * 10^{-6}$	$K * 10^{-3}$
(K)	$[m^2/s]$	$[m^2/s]$	$[W/m-K]$
290	15	21.18	25.5

4.5.6.3. Cálculo de los parámetros involucrados en la transferencia de calor por convección aire exterior

Para determinar cada parámetro es necesario tener definir cómo se da el flujo de aire en el interior de la cámara como se indica en la **Figura 4.20**.

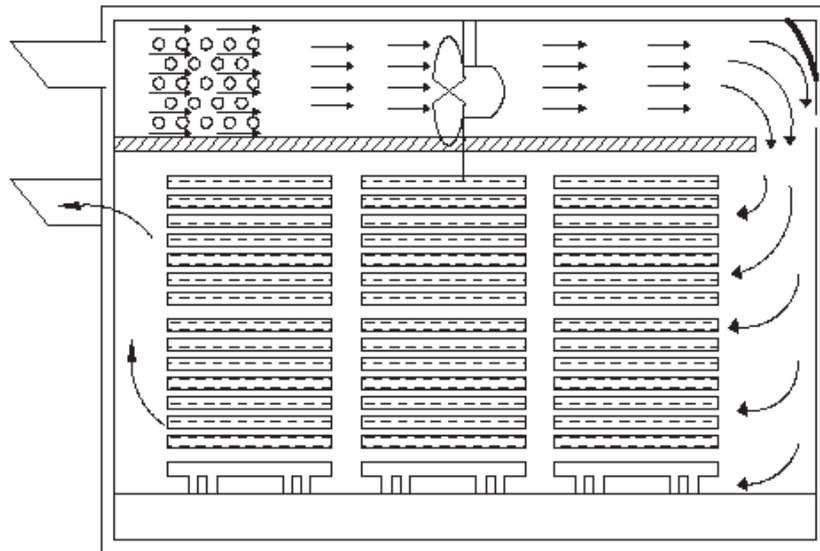


Figura 4. 20 Esquema de flujo de aire

Número de Reynolds a la temperatura de película del fluido frío

$$Re_L = \frac{2.03 \left[\frac{m}{s} \right] * 6.729m}{15 * 10^{-6} [m^2/s]}$$

⁶⁴ F. INCROPERA, D. DEWITT, *Fundamentos de transferencia de calor*, México, Prentice Hall, 1999, Pág. 839, Apéndice A, Tabla A.4, Propiedades termo físicas de gases a presión atmosférica.

$$Re_L = 910658$$

Número de Prandtl a la temperatura de película del fluido frío

$$Pr = \frac{15 * 10^{-6} [m^2/s]}{21.18 * 10^{-6} [m^2/s]}$$

$$Pr = 0.71$$

Para las paredes y puertas de la estructura se tendrá un caso de placa plana en un flujo paralelo.

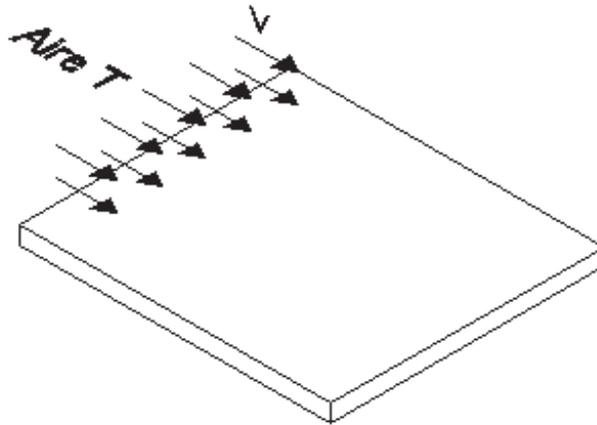


Figura 4. 21 Flujo de aire en las paredes del horno

Número de Nusselt a la temperatura de película del aire frío.

Para calcular la transferencia de calor que se da a través las paredes de la estructura de horno es necesario trabajar con coeficientes promedio.

Flujo externo, Número de Nusselt promedio ⁶⁵

Zona mezclada

$$500000 < Re < 10E8$$

$$0.6 < Pr < 60$$

$$\overline{Nu}_L = (0.037 * Re_L^{0.8} - 871) * Pr^{1/3}$$

⁶⁵ F. INCROPERA, D. DEWITT, *Fundamentos de transferencia de calor*, México, Prentice Hall, 1999, Pág. 356.

Dónde:

\overline{Nu}_L Número de Nusselt promedio

$$\overline{Nu}_L = (0.037 * 910658^{0.8} - 871) * 0.71^{1/3}$$

$$Nu_L = 1154.43$$

4.5.6.3.1. *Coefficiente convectivo externo a la temperatura de película del aire frío*⁶⁶

$$h = \frac{Nu_L * K}{L} \quad \text{Ec. (4. 20)}$$

Dónde:

h : Coeficiente convectivo de transferencia de calor $\left(\frac{W}{m^2-K}\right)$

$$h = \frac{1154.43 * 25.5 * 10^{-3} \left(\frac{W}{m-K}\right)}{6.729 (m)}$$

$$h = 4.37 \left(\frac{W}{m^2 - K}\right)$$

4.5.7. AIRE INTERIOR

EL aire caliente es forzado desde el intercambiador mediante ventiladores, se puede realizar el mismo análisis anterior para el cálculo de los coeficientes de convección.

Suponiendo la temperatura de la superficie interior de 35 °C y la temperatura máxima que alcanza el aire en el interior del horno es de 43.5 °C.

$$Tf_1 = \frac{(43.5 + 35)^\circ\text{C}}{2}$$

$$Tf_1 = 39.25^\circ\text{C}$$

⁶⁶ F. INCROPERA, D. DEWITT, *Fundamentos de transferencia de calor*, México, Prentice Hall, 1999, Pág. 314.

Propiedades evaluadas a esta temperatura ⁶⁷

Tabla 4. 19 Propiedades del aire a 312 K

T_{f1}	$\gamma * 10^{-6}$	$\alpha * 10^{-6}$	$K * 10^{-3}$
(K)	(m^2/s)	(m^2/s)	[$W/(m * K)$]
312	17.12	24.31	27.2

4.5.7.1. Parámetros adimensionales aire interior

Número de Reynolds a la temperatura de película del fluido caliente.

El fluido caliente debe tener una velocidad promedio de 1.2 m/s para que se dé un secado uniforme en la madera.

$$Re_L = \frac{1.2 \left(\frac{m}{s}\right) * 6.7(m)}{17.12 * 10^{-6}(m^2/s)}$$

$$Re_L = 469561.71$$

Número de Prantld a la temperatura de película del fluido caliente

$$Pr = \frac{17.12 (m^2/s)}{24.31 (m^2/s)}$$

$$Pr = 0.7$$

Número de Nusselt a la temperatura de película del fluido caliente⁶⁸

Flujo externo

Régimen Laminar

$$Re < 500000$$

$$Pr > 0.6$$

⁶⁷ F. INCROPERA, D. DEWITT, *Fundamentos de transferencia de calor*, México, Prentice Hall, 1999, Pág. 839, Apéndice A, Tabla A.4, Propiedades termo físicas de gases a presión atmosférica.

⁶⁸ F. INCROPERA, D. DEWITT, *Fundamentos de transferencia de calor*, México, Prentice Hall, 1999, Pág. 354.

$$\overline{Nu}_L = 0.664 * (Re_L)^{0.5} * (Pr)^{1/3} \quad \text{Ec. (4. 21)}$$

Dónde:

\overline{Nu}_L : Número de Nusselt promedio para flujo Laminar

$$\overline{Nu}_L = 0.664 * (469561.71)^{0.5} * (0.7)^{1/3}$$

$$\overline{Nu}_L = 404.81$$

4.5.7.1.1. *Coefficiente de convección a la temperatura de película del fluido caliente*

$$h = \frac{404.81 * 27.2 * 10^{-3} \left(\frac{W}{m-K} \right)}{6.7 (m)}$$

$$h = 1.82 \left(\frac{W}{m^2 - K} \right)$$

4.5.8. CÁLCULO DE LA RESISTENCIA TÉRMICA DE LA MAMPOSTERÍA

Tabla 4. 20 Conductividad térmica de los materiales que componen la pared del horno

Mortero	Mampostería
$[W/(m - K)]$	$[W/(m - K)]$
0.72	0.72

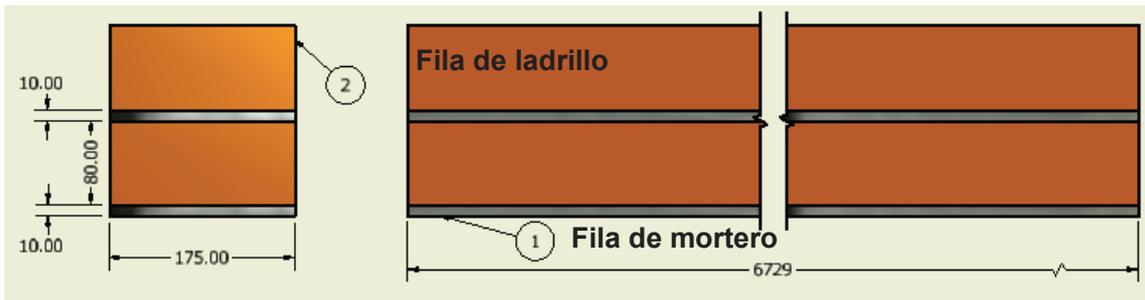


Figura 4. 22 Dimensiones de un arreglo de mampostería y mortero

Se trata de una pared que está compuesta de mortero y ladrillos los cuales presentan la misma conductividad térmica, para un mejor análisis se determina que existe primero una capa de mortero seguida de una capa de ladrillo la disposición de estos materiales nos da como resultado resistencias térmicas en paralelo. Este arreglo es repetitivo en toda la pared entonces se realizara un ejemplo de cálculo para esta primera parte.

La pared tiene una altura de 4.6 metros por lo la pared está compuesta por:

$$Nro\ de\ arreglos = \frac{4.600\ m}{(0.01 + 0.08)m} = 51$$

Resistencia térmica

$$R = \frac{l}{A * K} \quad \text{Ec. (4. 22)}$$

Dónde:

R : Resistencia térmica de una pared (K/W)

l : Longitud de la pared (m)

A : Área de la pared (m^2)

K : Conductividad térmica del material que está compuesta la pared ($W/m * K$)

Resistencia térmica en paralelo ⁶⁹

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$$

$$R_1 = \frac{0.175 \text{ m}}{(0.01 * 6.729)m^2 * 0.72 \frac{W}{m \cdot K}}$$

$$R_1 = 3.612 \frac{K}{W}$$

$$R_2 = \frac{0.175 \text{ m}}{(0.08 * 6.729)m^2 * 0.72 \frac{W}{m \cdot K}}$$

$$R_2 = 0.451 \frac{K}{W}$$

Si existen 51 arreglos de la manera indicada anteriormente se obtiene como resultado que tanto R1 como R2 se repiten 51 veces.

$$R_T = \frac{1}{51\left(\frac{1}{R_1}\right) + 51\left(\frac{1}{R_2}\right)}$$

$$R_T = 0.00786 \frac{K}{W}$$

4.5.9. CÁLCULO DEL CALOR PERDIDO POR LAS PAREDES LATERALES

Una vez encontrado las primeras suposiciones de coeficientes de convección, y usando la **Ecuación 4.2** se puede determinar fácilmente el calor perdido por las paredes.

$$q_x = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{\left[\left(\frac{1}{h_2 * A}\right) + \left(\frac{l_4}{K_4 * A}\right) + \left(\frac{l_3}{K_3 * A}\right) + \left(\frac{l_2}{K_2 * A}\right) + \left(\frac{1}{h_1 * A}\right)\right]}$$

⁶⁹ F. INCROPERA, D. DEWITT, *Fundamentos de transferencia de calor*, México, Prentice Hall, 1999, Pág. 79.

Tabla 4. 21 Resumen de resistencias térmicas para las paredes laterales

Elemento	Conductividad/ Coeficiente	Valor	Resistencia	Formula	Unidad	Valor
Fluido caliente	h_1	1.82	R_1	$\left(\frac{1}{h_1 * A}\right)$	m/W	1.79E-02
Mortero interior	K_2	0.72	R_2	$\left(\frac{l_2}{K_2 * A}\right)$	m/W	4.51E-05
Mampostería	K_3	0.72	R_3	$\left(\frac{l_3}{K_3 * A}\right)$	m/W	7.89E-03
Mortero exterior	K_4	0.72	R_4	$\left(\frac{l_4}{K_4 * A}\right)$	m/W	4.51E-05
Fluido frio	h_2	4.37	R_5	$\left(\frac{1}{h_2 * A}\right)$	m/W	7.42E-03
					$\sum R$	0.034

$$q_x = \frac{316.5 - 287(K)}{0.032 \left(\frac{K}{W}\right)}$$

$$q_x = 866.2 W$$

4.5.10. CÁLCULO DE LAS TEMPERATURAS EN LAS SUPERFICIES

4.5.10.1. Temperatura superficie externa

Para comprobar que la suposición inicial fue correcta se va a utilizar la fórmula de que asocia la resistencia térmica con la transferencia de calor mediante convección (Ley de enfriamiento de Newton)⁷⁰.

$$q_x = h * A * (T_s - T_\infty) \quad \text{Ec. (4. 23)}$$

Dónde:

q_x : Calor transferido por convección en la dirección \vec{x} (W)

⁷⁰ F. INCROPERA, D. DEWITT, *Fundamentos de transferencia de calor*, México, Prentice Hall, 1999, Pág. 8.

h : Coeficiente de convección [$W/(m^2 - K)$]

A : Área involucrada en la transferencia de calor (m^2)

T_S : Temperatura de la superficie de la pared (K)

T_∞ : Temperatura del fluido (K)

4.5.10.1.1. *Temperatura exterior*

$$T_{S5} = \frac{q_x}{h * A} + T_\infty$$

$$T_{S5} = \left[\frac{866.2 \text{ W}}{4.37 \left(\frac{W}{m^2-K} \right) * 30.82 \text{ m}^2} \right] + 287 \text{ K}$$

$$T_{S5} = 301.04 \text{ K}$$

$$T_{S5} = 28.04 \text{ K}$$

4.5.10.1.2. *Temperatura interior*

$$q_x = h * A * (T_\infty - T_S)$$

$$T_{S1} = T_\infty - \frac{q_x}{h * A}$$

$$T_{S1} = 316.5K - \left[\frac{866.2 \text{ W}}{1.82 \left(\frac{W}{m^2-K} \right) * 30.82 \text{ m}^2} \right]$$

$$T_{S1} = 293.42K$$

$$T_{S1} = 20.42 \text{ C}$$

Las temperaturas calculadas como medida de comprobación son diferentes a las que se supusieron al iniciar los cálculos de pérdidas de calor.

4.5.11. RECÁLCULO DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL DE LA PARED INTERNA Y EXTERNA

Como se pudo demostrar la primera aproximación de la temperatura superficial fue incorrecta se deberá hacer un recalcu con una nueva aproximación hasta conseguir un resultado que cumpla con la transferencia de calor por convección.

Usando el programa Excel se puede determinar los coeficientes de convección para las diferentes paredes así como las temperaturas superficiales.

4.5.12. RESULTADOS OBTENIDOS PAREDES LATERALES

Aire externo

Tabla 4. 22 Resultados obtenidos para convección aire externo

Tipo	Unidad	Pared latera	Pared Posterior
Temperatura superficie externa	(°C)	20.5	22.83
Longitud característica	(m)	6.73	4.09
Re	(-)	909309.19	547022.01
Pr	(-)	0.71	0.71
Tipo de flujo	(-)	Mezclado	Mezclado
Un	(-)	1152.1219	507.80
h(Externo)	$\left(\frac{W}{m^2 - K}\right)$	3.52	3.19
Área	(m ²)	30.82	17.02

Aire interno

Tabla 4. 23 Resultados obtenidos para convección aire externo

Descripción	Unidad	Pared lateral	Pared posterior
Temperatura superficie interna	(°C)	28.12	30.45
Longitud característica	(m)	6.7	4.6
Re	(-)	479420.40	311850.31
Pr	(-)	0.70	0.70
Tipo de flujo	(-)	Laminar	Laminar
Nu	(-)	409.15	329.77
h(interno)	$\left(\frac{W}{m^2 - K}\right)$	1.84	2.16
Área	(m ²)	30.82	17.02

Tabla 4. 24 Resultados de resistencia térmica para las paredes de mampostería

Tipo	R1	R2	R3	R4	R5	Perdida de calor
Unidad	(K/W)	(K/W)	(K/W)	(K/W)	(K/W)	(W)
Pared lateral	1.77E-02	4.51E-04	7.89E-03	4.51E-04	7.43E-03	870.79
Pared posterior	2.72E-02	8.16E-04	1.43E-02	8.16E-04	1.84E-02	478.89

4.5.13. RESULTADOS OBTENIDOS TECHO

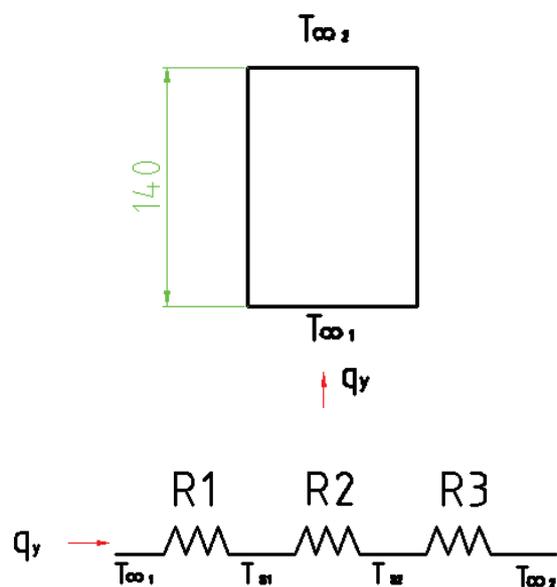


Figura 4. 23Circuito térmico equivalente para el techo

Tabla 4. 25 Resultados obtenidos para convección techo

Tipo	Unidad	Superficie Techo externo	Superficie Techo interno
Temperatura superficie	($^{\circ}C$)	20.95	26.82
Longitud característica	(m)	6.92	6.7
Re	(-)	917984.52	466138.30
Pr	(-)	0.71	0.70
Tipo de flujo	(-)	Mezclado	Laminar
Nu	(-)	1166.45755	403.30
h	($\frac{W}{m^2 - K}$)	4.34	1.81
Área	(m^2)	24.79	24.79
Perdida de calor	(W)	748.53	

Tabla 4. 26 Resultados de resistencia térmica para el techo

Tipo	R_1	R_2	R_3	Perdida de calor
Unidad	(K/W)	(K/W)	(K/W)	(W)
Techo	0.0223	0.0078	0.0093	748.53

4.5.14. RESULTADOS OBTENIDOS PARA LAS PUERTAS

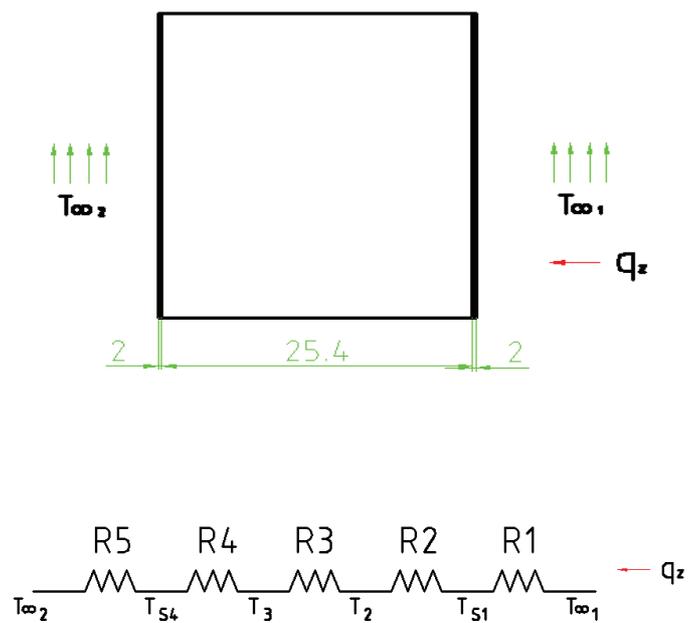


Figura 4. 24 Circuito térmico equivalente para las puertas

Tabla 4. 27 Resultados obtenidos para convección aire externo

Tipo	Unidad	Superficie puerta externo	Superficie puerta interno
Temperatura superficie	(°C)	22.08	38.28
Longitud característica	(m)	3.70	4.6
Re	(-)	497779.84	304918.47
Pr	(-)	0.71	0.70
Tipo de flujo	(-)	Mezclado	Laminar
Nu	(-)	414.51	326.00
h	$\left(\frac{W}{m^2 - K}\right)$	2.87	2.65
Área	(m ²)	17.02	17.02
Perdida de calor	(W)	394.03	

Tabla 4. 28 Resultados de resistencia térmica para las puertas

Tipo	R1	R2	R3	R4	R5	Perdida de calor
Unidad	(K/W)	(K/W)	(K/W)	(K/W)	(K/W)	(W)
Puerta	0.013	0	0.035	0	0.0205	425.86

4.6. RESULTADO DE CALOR ENTREGADO POR ETAPAS

A continuación se muestra un resumen de los resultados calculados anteriormente.

Tabla 4. 29 Calores en la etapa de calentamiento

Etapa de calentamiento		
Calentamiento de la madera	59.89	KW
Calentamiento de espaciadores	0.587	KW
Calentamiento del aire	0.126	KW
Calentamiento de la capa de mortero	0.795	KW
Calentamiento de la pared de mampostería	15.378	KW
Calentamiento de la pared exterior de mortero	0.813	KW
Calentamiento del techo del horno	4.05	KW
Calentamiento del cielo falso	0.50	KW
Calentamiento puertas	0.133	KW
Resultado	82.27	KW

Tabla 4. 30 Calor debido a las pérdidas

Pérdidas de calor		
Calor perdido pared 1-2	1.74	KW
Calor perdido pared 3	0.48	KW
Calor perdido Techo	0.75	KW
Calor perdido Puertas	0.43	KW
Total pérdidas de calor	3.39	KW

Tabla 4. 31 Calor para evaporar el agua

Calor para evaporar el agua		
Calor para eliminar el agua libre	12.15	KW
Calor para eliminar el agua ligada	23.99	KW

En cada etapa de secado se debe aumentar las pérdidas de calor que se producen por lo que se obtiene los siguientes resultados:

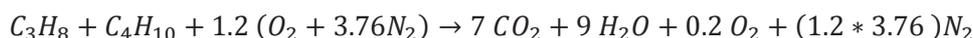
Tabla 4. 32 Calor a entregar en cada etapa de secado

Etapa de calentamiento	85.66	KW
80 a 30 % de CH	15.54	KW
30 a 12 % de CH	27.38	KW

4.6.1. REACCIÓN DE COMBUSTIÓN LPG-AIRE⁷¹

La combustión perfecta es la que se produce, teóricamente, de acuerdo a cantidades estequiométricas de combustible y comburente, este tipo de reacción sólo se puede lograr en un laboratorio y no se da en la práctica industrial.

Reacción estequiométrica:



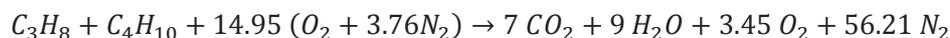
La combustión completa es aquella en la cual todo el carbono del combustible reacciona con el oxígeno del comburente para dar dióxido de carbono. Para que ello ocurra, en la combustión completa, es necesario agregar una cantidad mayor de comburente (oxígeno) que el requerido estequiométricamente (teórico), ese exceso es el denominado "exceso de aire, para la puesta a punto de la combustión, las condiciones que deben cumplir los gases de combustión son dos: que el porcentaje de CO tienda a cero y que el exceso de aire sea menor o igual al 30 %. Cuando ambas se cumplen, se dice que la combustión está a punto, por lo que se escoge un exceso de aire del 30%⁷².

Combustible + Aire= Productos



$$2.6 a_{th} = 14 + 9 + 0.6 a_{th}$$

$$a_{th} = 11.5$$



4.6.2. RELACIÓN AIRE-COMBUSTIBLE (exceso de aire del 30%)⁷³

Es la relación que existe entre la masa de aire y la masa de combustible existente en la ecuación de combustión con un 30 % de exceso de aire.

⁷¹Y. CENGEL, M. BOLES, (2002); *Termodinámica*. México-México DF, McGraw-Hill, pag: 772, 773.

⁷²http://materias.fi.uba.ar/7202/MaterialAlumnos/11_Apunte%20Combustion.pdf

⁷³Y. CENGEL, M. BOLES, (2002); *Termodinámica*. México-México DF, McGraw-Hill, pag: 772,

$$R_{AC} = \frac{m_{aire}}{m_{comb}} \quad \text{Ec. (4. 24)}$$

Dónde:

R_{AC} : Relación Aire Combustible (Kg_{aire}/Kg_{comb})

m_{aire} : Masa de aire en la reacción con exceso de aire (Kg)

m_{comb} : Masa de combustible en la reacción exceso de aire (Kg)

$$R_{AC} = \frac{14.95 * (4.76 Kmol_{aire}) \left(28.97 \frac{Kg_{aire}}{Kmol_{aire}} \right)}{(3 Kmol) \left(12 \frac{Kg}{Kmol} \right) + (8 Kmol) \left(1 \frac{Kg}{Kmol} \right) + (4 Kmol) \left(12 \frac{Kg}{Kmol} \right) + (10 Kmol) \left(1 \frac{Kg}{Kmol} \right)}$$

$$R_{AC} = 20.21 \frac{Kg_{aire}}{Kg_{comb}}$$

4.6.3. REACCIÓN DE COMBUSTIÓN CONSIDERANDO LA CANTIDAD DE HUMEDAD⁷⁴

Para obtener una ecuación de combustión que se asemeje a la realidad se debe aumentar las moles de agua existentes en la humedad del ambiente.

Cantidad de aire seco

$$N_{at} = 14.95 N_a \quad \text{Ec. (4. 25)}$$

Dónde:

N_{at} : Número de moles totales de aire seco ($Kmol$)

N_a : Número de moles en la relación estequiometrica ($Kmol$)

$$N_{at} = 14.951 * 4.76 (Kmol_{aire\ seco})$$

$$N_{at} = 71.16 Kmol_{aire\ seco}$$

$$P_{v,aire} = \phi_{aire} P_{sat@14^{\circ}C}$$

Dónde:

$P_{v,aire}$: Presión parcial de la humedad en el aire (KPa)

⁷⁴Y. CENGEL, M. BOLES, (2002); *Termodinámica*. México-México DF, McGraw-Hill, pag: 772,

ϕ_{aire} : Humedad relativa del aire (%)

$P_{sat@14^\circ C}$: Presión de saturación del agua a 14 °C (KPa)

$$P_{v,aire} = (0.6)(1.591 \text{ KPa})$$

$$P_{v,aire} = 1.55 \text{ KPa}$$

Si se supone que el aire tiene un comportamiento de gas ideal, entonces el número de moles de humedad en el aire es

$$N_{v,aire} = \left(\frac{P_{v,aire}}{P_{total}} \right) N_{total} \quad \text{Ec. (4. 26)}$$

Dónde:

$N_{v,aire}$: Numero de moles de humedad en el aire (Kmol)

$P_{v,aire}$: Presión parcial de la humedad en el aire (KPa)

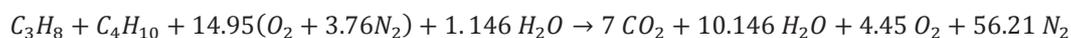
P_{total} : Presión total (atmosférica) (KPa)

N_{total} : Numero de moles total del aire (Kmol)

$$N_{v,aire} = \left(\frac{1.155 \text{ KPa}}{71.7 \text{ KPa}} \right) (71.16 + N_{v,aire})$$

$$N_{v,aire} = 1.146 \text{ Kmol}$$

Se puede obtener la ecuación de combustión balanceada agregando el número de moles de humedad.



Ec. (4. 27)

4.6.4. PUNTO DE ROCÍO DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN⁷⁵

Se conoce como punto de rocío la temperatura a la cual el vapor de agua que se encuentra presente en los gases de combustión condensa, como se trata de una

⁷⁵Y. CENGEL, M. BOLES, (2002); *Termodinámica*. México-México DF, McGraw-Hill, pag: 772,

mezcla gas vapor la temperatura de saturación del vapor corresponderá a su presión parcial.

Considerando que el vapor de agua tiene un comportamiento de gas ideal se determinara la presión parcial en los productos.

$$P_{v,prod} = \left(\frac{N_{v,prod}}{N_{prod}} \right) P_{prod} \quad \text{Ec. (4. 31)}$$

Dónde:

$P_{v,prod}$: Presión parcial del vapor de agua en los productos (KPa)

$N_{v,prod}$: Número de moles de vapor de agua en los productos (Kmol)

N_{prod} : Número de moles total de los productos (Kmol)

P_{prod} : Presión total de los productos (atmosférica) (Kmol)

$$P_{v,prod} = \left(\frac{10.146 \text{ Kmol}}{77.8 \text{ Kmol}} \right) 71.7 \text{ Kpa}$$

$$P_{v,prod} = 9.35 \text{ KPa}$$

$$T_{sat@10.13 \text{ KPa}} = 44.37 \text{ }^\circ\text{C}$$

4.6.5. TEMPERATURA DE FLAMA ADIABÁTICA⁷⁶

Esta temperatura es la máxima que puede alcanzar los gases productos de la combustión, considerando que no hay perdidas de calor con los alrededores.

$$H_{prod} = H_{react} \quad \text{Ec. (4. 28)}$$

$$\sum N_p (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_p = \sum N_r \bar{h}_{f,r}^\circ$$

Dónde:

N_p : Número de moles de cada producto (Kmol)

⁷⁶Y. CENGEL, M. BOLES, (2002); *Termodinámica*. México-México DF, McGraw-Hill, pag: 772,

\bar{h}_f° : Entalpia de formación de cada producto(KJ/Kmol)

\bar{h} : Entalpia de cada producto a la temperatura de salida(KJ/Kmol)

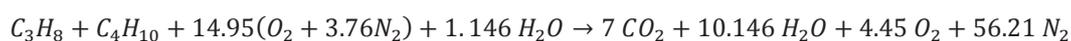
\bar{h}° : Entalpia de cada producto a la temperatura de entrada(KJ/Kmol)

N_r : Número de moles de cada reactivo(Kmol)

$\bar{h}_{f,r}^\circ$: Entalpia de formación de cada reactivo(KJ/Kmol)

Tabla 4. 33 Entalpias de formación de cada producto de combustión

Sustancia	\bar{h}_{of} [KJ/Kmol]	$\bar{h}_{286.8k}$ [KJ/Kmol]
C_4H_{10}	-126150	-
C_3H_8	-103850	-
O_2	0	8349.24
N_2	0	8338.88
H_2Og	-241820	9523.8
CO_2	-393520	8945.88



$$\begin{aligned}
 & (7Kmol CO_2) \left[(-393520 + \bar{h}_{CO_2} - 8945.88) \frac{KJ}{Kmol CO_2} \right] \\
 & + (10.146 Kmol H_2O) \left[(-241820 + \bar{h}_{H_2O} - 9523.8) \frac{KJ}{Kmol H_2O} \right] \\
 & + (4.45 Kmol O_2) \left[(0 + \bar{h}_{O_2} - 8349.24) \frac{KJ}{Kmol O_2} \right] \\
 & + (56.21 Kmol N_2) \left[(0 + \bar{h}_{N_2} - 8338.88) \frac{KJ}{Kmol N_2} \right] \\
 & = (1 Kmol C_3H_8) \left[(-103850) \frac{KJ}{Kmol C_3H_8} \right]
 \end{aligned}$$

$$+(1 \text{ Kmol } C_4H_{10}) \left[(-126150) \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol } C_3H_8} \right]$$

$$7 \bar{h}_{CO_2} + 10.146 \bar{h}_{H_2O} + 4.45 \bar{h}_{O_2} + 56.21 \bar{h}_{N_2} = 5873277.92 \text{ KJ}$$

Para encontrar la temperatura de flama adiabática se supone temperaturas para encontrar la entalpia de cada producto en tablas y así poder igualar la ecuación, como primera aproximación se supone una temperatura de salida de 2300 °C.

Tabla 4. 34 Entalpia de los gases de combustión a 2300 K

Productos de la combustión	Numero de moles	Entalpia a 2300 K	Producto $N * \bar{h}$
-	[Kmol]	[KJ/Kmol]	[KJ]
CO2	7	119035	833245
H2O	10.146	98199	905013.054
O2	3.45	79316	273640.02
N2	56.21	75676	4253747.96
		$\sum N * \bar{h}$	6265646.21

La primera estimación no iguala la ecuación, se obtiene un valor superior al esperado se realiza la misma operación para tener un valor inferior.

Interpolando se encuentra que la temperatura de salida de los productos de combustión es:

$$T_{prod} = 2068.89 \text{ K}$$

En el caso de hornos industriales se considera que la temperatura real de combustión es de un 60% a 80% menor que la temperatura adiabática de llama.⁷⁷

$$T_{real \text{ de combustión}} = 1077.53 \text{ °C}$$

⁷⁷http://www.areadecalculo.com/monograficos/vidrio/PDFs/Cap_4Combustion.pdf

4.7. PROPIEDADES DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN⁷⁸

Las propiedades de una mezcla de gases dependen de las propiedades de sus componentes, de su composición y de las condiciones de presión y temperatura a la que están expuestas.

En este caso la mezcla tiende al estado de gas ideal debido a que la presión es lo suficientemente baja y esta no afecta las propiedades de la mezcla.

4.7.1. Peso Molecular

Una forma de calcular el peso molecular de una mezcla de gases es utilizando el peso molecular de cada gas que integra la mezcla y la fracción molar de cada una, que es la relación entre los moles de un gas con respecto a los moles totales de la mezcla.

$$PM_{gc} = \sum_{i=1}^n x_i * PM_i \quad \text{Ec. (4. 33)}$$

Dónde:

PM_{gc} : Peso molecular de la mezcla de gases (Kg/Kgmol)

x_i : Fracción molar del componente i (-)

PM_i : Peso molecular del componente i (KJ/Kgmol)

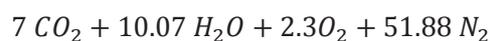


Tabla 4. 35Peso molecular de los gases de combustión.

COMPONENTE i	FRACCIÓN MOLAR x_i	PESO MOLECULAR PM_i	PESO MOLECULAR DE LA MEZCLA
CO_2	0,09113871	44	4,01010338
H_2O	0,13209905	18	2,37778299
O_2	0,04491837	32	1,4373877
N_2	0,73184387	28	20,4916283
GASES DE COMBUSTION			28,3169023

⁷⁸THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF MATTER, (1970); *Thermophysical Properties of matter*.New York.

4.7.2. DENSIDAD

La densidad de una mezcla de gases se puede calcular con ayuda de la ecuación de gas ideal:

$$\rho_{gc} = \frac{P \cdot PM_{gc}}{\bar{R}T} \text{Ec. (4. 34)}$$

Dónde:

ρ_{gc} : Densidad de la mezcla (Kg/m^3)

P : Presión atmosférica $71700(\text{Pa})$

PM_{gc} : Peso molecular de la mezcla (Kg/Kgmol)

\bar{R} : Constante universal de los gases $8314.34 \left(\frac{\text{Pam}^3}{\text{Kgmol}^\circ\text{K}} \right)$

T : Temperatura real de combustión $1077.53 \text{ }^\circ\text{C} = 1350.53(\text{ }^\circ\text{K})$

$$\rho_{gc} = 0.1808 \text{ Kg}/\text{m}^3$$

4.7.3. CALOR ESPECÍFICO

Una forma de calcular el calor específico de una mezcla de gases es utilizando el calor específico de cada gas que integra la mezcla, la fracción molar de cada una y la siguiente ecuación:

$$\overline{CP}_{gc} = \sum_{i=1}^n x_i * \overline{CP}_i \quad \text{Ec. (4. 35)}$$

Dónde:

\overline{CP}_{gc} : Calor específico de la mezcla de gases ($\text{J}/\text{Kgmol}^\circ\text{C}$)

x_i : Fracción molar del componente $i(-)$

\overline{CP}_i : Calor específico del componente i ($\text{J}/\text{Kgmol}^\circ\text{C}$)

CP_{gc} : Calor específico de la mezcla de gases (J/Kg°C)

Tabla 4. 36 Calor específico de los gases de combustión.

COMPONENTE i	FRACCIÓN MOLAR x_i	CALOR ESPECÍFICO	CALOR ESPECÍFICO DE LA MEZCLA
CO_2	0,09113871	57511,59	5241,532
H_2O	0,13209905	45398,07	5997,042
O_2	0,04491837	36163,15	1624,389
N_2	0,73184387	34325,53	25120,93
CALOR ESPECÍFICO DE LOS GASES DE COMBUSTION			37983,897

$$CP_{gc} = \frac{\overline{CP_{gc}}}{PM_{gc}} \text{ Ec. (4. 36)}$$

$$CP_{gc} = \frac{37983,89 \text{ J/Kgmol}^\circ\text{C}}{28,316 \text{ Kg/Kgmol}}$$

$$CP_{gc} = 1341,386 \text{ J/Kg}^\circ\text{C}$$

4.7.4. VISCOSIDAD ⁷⁹

La teoría de Chapman-Enskog es utilizada para calcular la viscosidad de una mezcla de gases multicomponentes a baja densidad, esta teoría utiliza las siguientes ecuaciones:

$$u_{gc} = \sum_{i=1}^n \frac{u_i x_j}{1 + \sum_{j=1}^n \phi_{ij} \frac{x_j}{x_i}} \text{ Ec. (4. 37)}$$

$$\gamma_{gc} = \frac{u_{gc}}{\rho_{gc}} \text{ Ec. (4. 38)}$$

$$\phi_{ij} = \frac{(1 + \left[\frac{u_i}{u_j}\right]^2 \left[\frac{PM_j}{PM_i}\right]^{\frac{1}{4}})^2}{\sqrt{8 \left[1 + \frac{PM_i}{PM_j}\right]}} \text{ Ec. (4. 39)}$$

Dónde:

⁷⁹<https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2010/2/MI3010/1/material.../310387>

u_{gc} : Viscosidad dinámica o absoluta de la mezcla de gases ($Pa \cdot s$)

u_i : Viscosidad dinámica o absoluta del componente i ($Pa \cdot s$)

ϕ_{ij} : Coeficiente de difusión de la teoría cinética de Shuterland

x : Fracción molar del componente i, j

γ_{gc} : Viscosidad cinemática de la mezcla de gases

PM_i : Peso molecular del componente ($Kg/Kmol$)

Tabla 4. 37 Coeficiente de difusión de la teoría cinética de Shuterland.

<i>Compon. i</i>	<i>PM_i</i>	<i>u_i</i>	<i>Compon. j</i>	<i>PM_j</i>	<i>u_j</i>	<i>φ_{ij}</i>
CO2	44	5,13E-05	H2O	19	4,80E-05	0,655
			N2	48	4,77E-05	1,084
			O2	32	6,21E-05	0,776
H2O	19	4,80E-05	CO2	44	5,13E-05	1,421
			N2	48	4,77E-05	1,535
			O2	32	6,21E-05	1,121
N2	28	4,77E-05	CO2	44	5,13E-05	1,194
			H2O	19	4,80E-05	0,815
			O2	32	6,21E-05	0,937
O2	32	6,21E-05	CO2	44	5,13E-05	1,291
			H2O	19	4,80E-05	0,861
			N2	48	4,77E-05	1,40

Tabla 4. 38 Viscosidad dinámica de los gases de combustión a 2300 °K

Compon. i	U (Pa.s)	Compon. j	θ_{ij}	X_i	x_j	x_j/x_i	Kgc
CO2	5,13E-05	H2O	0,655992	0,09114	0,1321	1,4494	5,89E-06
		N2	1,084031		0,0449	0,4929	
		O2	0,776161		0,7318	8,03	
H2O	4,80E-05	CO2	1,421213	0,1321	0,0911	0,6899	5,51E-06
		N2	1,535403		0,0449	0,34	
		O2	1,121898		0,7318	5,5401	
N2	4,77E-05	CO2	1,194808	0,04492	0,0911	2,029	2,26E-06
		H2O	0,815314		0,1321	2,9409	
		O2	0,937804		0,7318	16,293	
O2	6,21E-05	CO2	1,291866	0,73184	0,0911	0,1245	4,43E-05
		H2O	0,861904		0,1321	0,1805	
		N2	1,402785		0,0449	0,0614	
Viscosidad Dinámica de la mezcla (Pa s)							5,79E-05
Viscosidad Cinemática de la mezcla (m²/s)							0,00032

4.7.5. CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

Para calcular la conductividad térmica de una mezcla de gases se utiliza el calor específico de cada gas que integra la mezcla, la fracción molar de cada una y los coeficientes de difusión calculados anteriormente con la teoría de Chapman-Enskog:

$$K_{gc} = \sum_{i=1}^n \frac{K_i x_i}{1 + \sum_{j=1}^n \phi_{ij} \frac{x_j}{x_i}} \quad \text{Ec. (4. 40)}$$

Dónde:

K_{gc} Conductividad de la mezcla [W/m · K]

K_i Conductividad térmica del componente i

ϕ_{ij} Coeficiente de difusión de la teoría cinética

ij Subíndice que representa a cada componente

Tabla 4. 39 Conductividad térmica de la mezcla de gases.

Componente i	K (W/m°C)	Componente j	θ_{ij}	X_i	x_j	Kgc
CO2	0,08462	H2O	0,655992	0,091	0,1321	0,0097067
		N2	1,084031		0,0449	
		O2	0,776161		0,7318	
H2O	0,12305	CO2	1,421213	0,132	0,0911	0,0141144
		N2	1,535403		0,0449	
		O2	1,121898		0,7318	
N2	0,083628	CO2	1,194808	0,045	0,0911	0,0039632
		H2O	0,815314		0,1321	
		O2	0,937804		0,7318	
O2	0,08973	CO2	1,291866	0,732	0,0911	0,0639762
		H2O	0,861904		0,1321	
		N2	1,402785		0,0449	
Conductividad térmica de la mezcla W/(m°C)						0,0917604

4.7.6. NÚMERO DE PRANDTL

El número de Prandtl para una mezcla de gases está en función de su calor específico, viscosidad dinámica y la conductividad de la mezcla.

$$PR_{gc} = \frac{CP_{gc} \cdot u_{gc}}{K_{gc}} \quad \text{Ec. (4. 41)}$$

Dónde:

PR_{gc} : Número de prandlt de la mezcla de gases

CP_{gc} : Calor específico de la mezcla $\left(\frac{J}{kg \cdot ^\circ C}\right)$

u_{gc} : Viscosidad dinámica o absoluta de la mezcla de gases $[Pa \cdot s]$

K_{gc} : Conductividad de la mezcla $[W/m \cdot K]$

$$PR_{gc} = \frac{1341,386 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C} * 5,79E - 05 Pa \cdot s}{0,0917604 W/m \cdot K}$$

$$PR_{gc} = 0,847$$

4.8. CAUDAL DE AIRE NECESARIO⁸⁰

El caudal de aire depende de la velocidad del aire recomendada que tiene que pasar por la pila de madera y de la área por la cual circula, se debe tener en cuenta si el aire que va a pasar por la madera será el necesario para secar esta, por lo que se realiza el análisis psicrométrico.

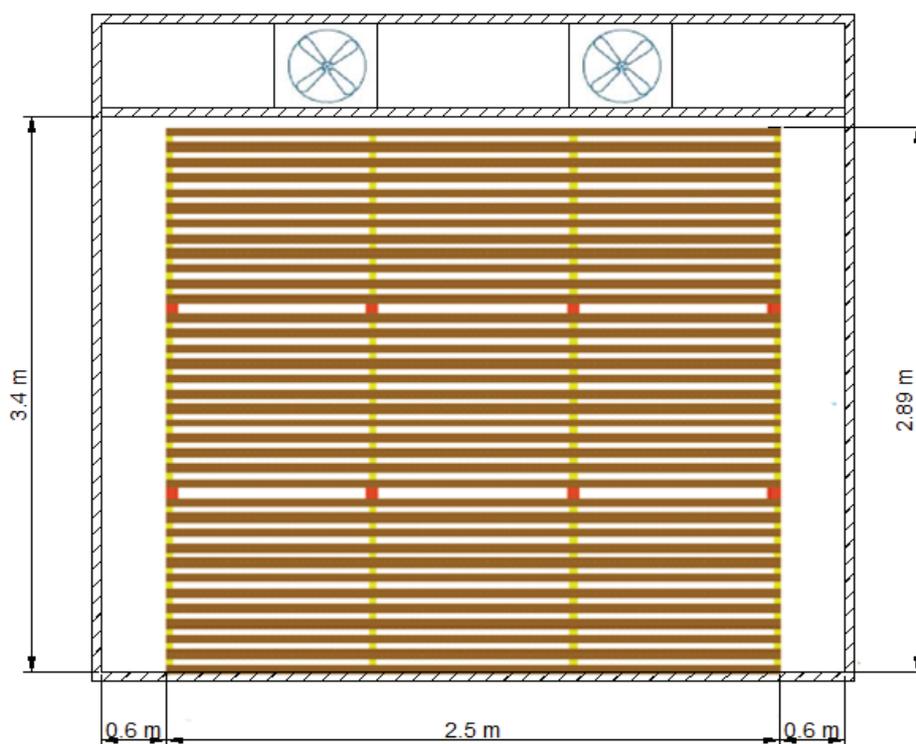


Figura 4. 25 Área libre

Considerando una velocidad de 1,2 m/s y el área de flujo por la cual tiene que pasar el aire se obtiene el caudal de aire necesario con ayuda de la siguiente ecuación:

$$\dot{V} = A_L * v \quad \text{Ec. (4. 32)}$$

$$A_L = \{(Ap) - n[At+4Ae]\} + 2(0,6 \times 3,4)$$

⁸⁰A. PORTILLA; G.BACERO, (1991-1992); *Seminario de Secadores*. AEIM.

Dónde:

\dot{V} : Caudal de aire a calentar $\left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)$

A_L : Área libre de flujo del aire (m^2)

v : Velocidad recomendada de aire 1,2 $\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$

A_p : Área de la pila (m^2)

n : Número de filas de los tablones (-)

A_t : Área del tablón (m^2)

A_e : Área de los espaciadores (m^2)

$$A_L = \{(2.89 \times 2.5) - 36[(2.5 \times 0.05) + 4(0.03 \times 0.03)]\} + 2(0.6 \times 3.4)$$

$$A_f = 4.72 \text{m}^2$$

$$\dot{V} = 4.72 * 1.2 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$$

$$\dot{V} = 5.66 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right) = 11992.87 \text{ CFM}$$

$$m_{\text{aire}} = 6.57 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

Ahora considerando el proceso psicrometrico de secado se obtendrá el flujo másico mínimo de aire necesario para el proceso.

El diagrama de la **Figura 4.28** muestra el proceso de calentamiento de aire 1-2 y el proceso de secado corresponde a la línea 2-4, la perdida de calor sensible del aire se compensa con la ganancia de calor latente que lleva consigo la masa de agua que se separa del producto y que se difunde en la corriente de aire.

Es importante saber que el proceso de secado de madera es diferente al de la figura ya que en esta se muestra un secado brusco con aire seco entrando al secador, para la madera se necesita acondicionar el aire (humidificar) antes de que este tenga contacto con la madera para evitar deformaciones.

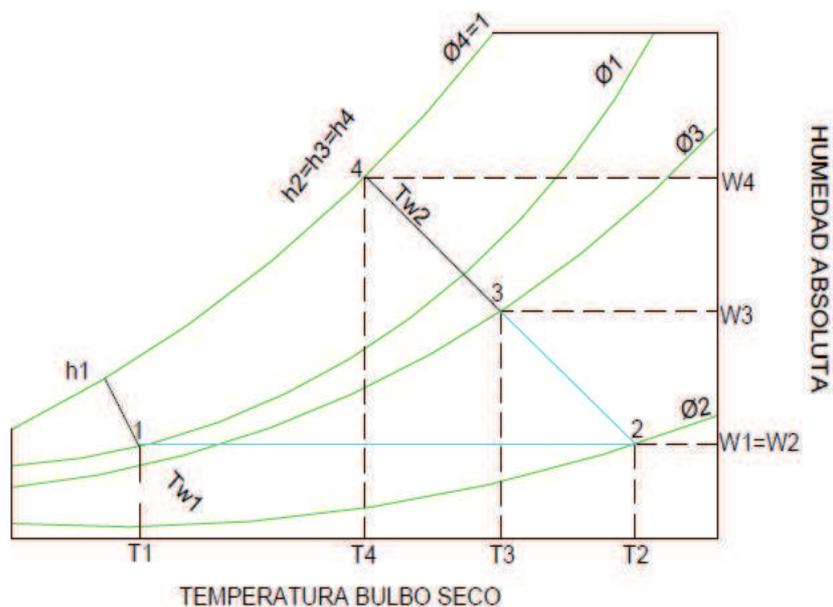


Figura 4. 26 Esquema del proceso de calentamiento y secado brusco⁸¹

En condiciones ideales el aire que abandona la cámara de secado, se encuentra saturado por cuanto la cantidad de humedad evaporada corresponde a la cantidad de calor sensible pérdida por el aire, en condiciones reales, el aire que abandona la cámara de secado, no se encuentra saturado por cuanto la masa de agua evaporada es menor debido a la existencia de pérdidas de calor sensible, proceso 2-3.

La cantidad de humedad removida por el aire en el proceso de secado, está dada por el siguiente balance de materia:

En condiciones ideales:

$$m_{as}w_2 + m_{wi} = m_{as}w_4 \quad \text{Ec. (4. 45)}$$

$$m_{wi} = m_{as}(w_4 - w_2)$$

⁸¹A. PORTILLA; G.BACERO, (1991-1992); *Seminario de Secadores*. AEIM.

En condiciones reales:

$$m_w = m_{as}(w_3 - w_2) \quad \text{Ec. (4. 46)}$$

Dónde:

m_{as} : Masa de aire seco (Kg)

m_w : Masa de agua (Kg)

w : Humedad específica $\left(\frac{\text{Kg de agua}}{\text{Kg de aire seco}}\right)$

En la figura se muestra el proceso que sigue al aire de calentamiento.

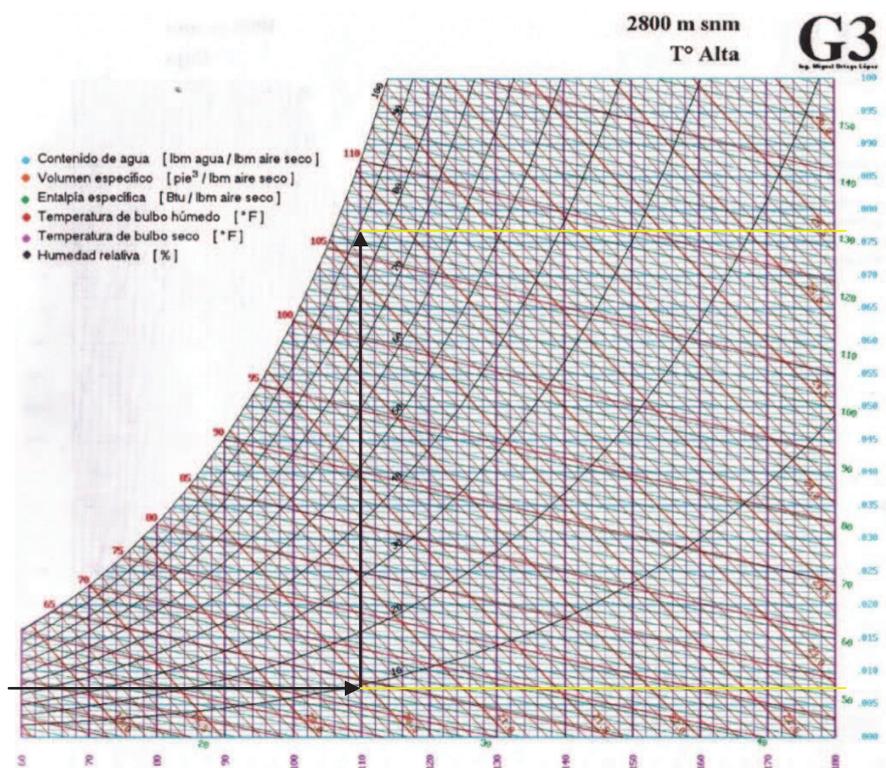


Figura 4. 27 Esquema del proceso de calentamiento⁸²

Para el proceso de secado de 80-30% de contenido de humedad en la madera, se debe ingresar aire a 49 °C con una humedad del 90% según el programa de secado.

⁸²M. ORTEGA, A. PEÑA; *Cartas Psicrométricas*. Ecuador, E.P.N

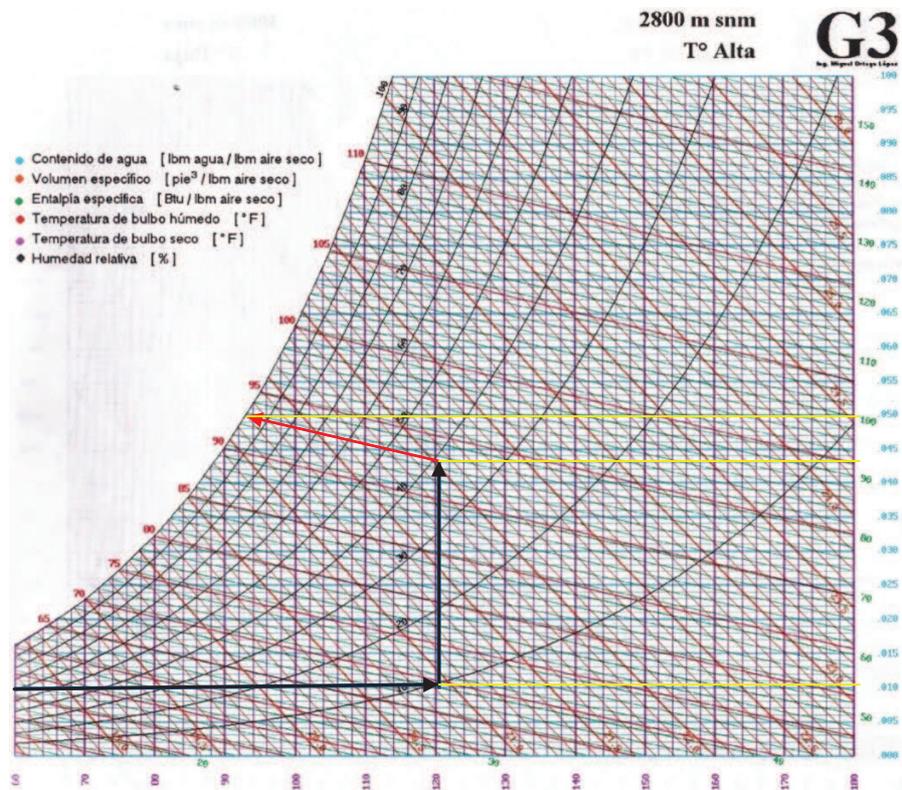


Figura 4. 28 Esquema del proceso de secado de 80-20% CH⁸³

El secado se produce en 3-4 con lo cual se procede a calcular el aire seco necesario:

$$m_{as} = \frac{m_w}{w_4 - w_3}$$

$$m_{as} = \frac{4791.67 \text{ kgagua}}{(0.05 - 0.044) \frac{\text{kgagua}}{\text{kgaireseco}}} = 798611.67 \text{ kgaireseco}$$

Una vez calculado aire seco se procede a calcular el aire húmedo con ayuda de la humedad específica a condiciones ambientales (w_1).

$$m_{ah} = m_{as} * w_1$$

⁸³M. ORTEGA, A. PEÑA; *Cartas Psicrométricas*. Ecuador, E.P.N

$$m_{ah} = 798611.67 \text{ kg aire seco} * 0.01 \frac{\text{kg agua}}{\text{kg aire seco}}$$

$$m_{ah} = 7986.11 \text{ kg agua}$$

$$m_{aire} = m_{as} + m_{ah}$$

$$m_{aire} = 806597.79 \text{ Kg aire}$$

Para calcular el flujo másico se divide el tiempo que dura esta etapa de secado para el aire necesario para secar.

$$\dot{m}_{aire} = \frac{m_{aire}}{t_{sec}} = 0.9 \frac{\text{kg aire}}{\text{s}}$$

Para el secado de 30% a 12 % se realiza el mismo procedimiento con ayuda de la carta psicrométrica:

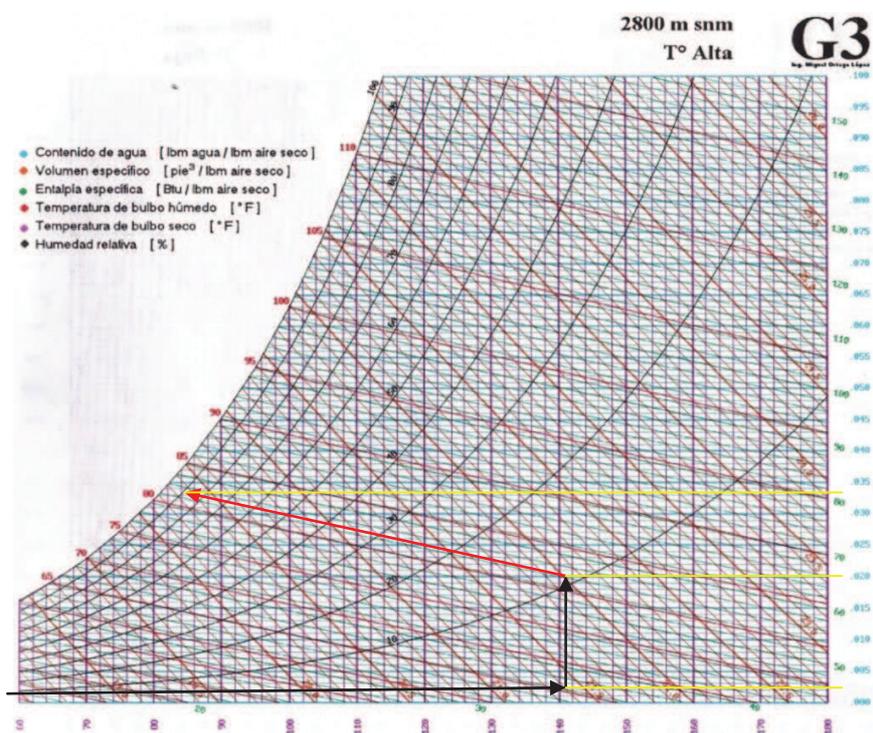


Figura 4. 29 Esquema del proceso de secado de 30-12% CH⁸⁴

⁸⁴M. ORTEGA, A. PEÑA; *Cartas Psicrométricas*. Ecuador, E.P.N

Tabla 4. 40 Resultados de datos obtenidos por psicrometría.

Etapa	Masa de agua <i>Kg</i>	<i>t</i> <i>h</i>	$w_1 w_2$	w_3	w_4	m_{as} <i>Kg</i>	m_{aire} <i>Kg</i>	\dot{m}_{aire} $\frac{Kg}{s}$
Calentamiento	-	5.9	0.01	0.079	-	-	-	0.81
Seca. 80-30%	4791.67	250.61	0.01	0.044	0.05	798611.67	806597.79	0.9
Seca. 30-12%	1724.99	138.91	0.01	0.026	0.040	123213.57	124445.70	0.25

Los flujos máscicos mínimos necesarios para la primera y segunda etapa de secado son menor a 1 Kg/s, y el flujo máscico necesario para tener la velocidad del aire recomendada (1,2 m/s) es de 11,82 Kg/s, por lo que se concluye que si tomamos el flujo máscico más grande, este será el suficiente para que se produzca el secado, pero al incrementar el flujo máscico los tiempos de secado disminuirán.

4.9. CONSUMO DE COMBUSTIBLE⁸⁵

Tipo de combustible: LPG (Gas licuado de petróleo, principalmente propano y butano)

Contenido energético: 46000 KJ/Kg⁸⁶.

$$RC = \frac{\dot{Q}_{cal}}{PC} \quad \text{Ec. (4. 29)}$$

Dónde:

RC : Requerimiento de combustible (L/s)

\dot{Q}_{cal} : Calor en la etapa de calentamiento(KW)

PC : Poder calórico del combustible(KJ/L)

$$RC = \frac{85,66 (KW)}{46000 \left(\frac{KJ}{Lt}\right)}$$

⁸⁵Y. CENGEL, M. BOLES, (2002); *Termodinámica*. México-México DF, McGraw-Hill,pag: 772,

⁸⁶<http://www.stilar.net/Archivos%20Web/Gas%20natural.pdf>

$$RC = 0.027 \left(\frac{L}{s} \right)$$

Tabla 4. 41 Caudal másico requerido de combustible para cada etapa

Etapa	Flujo másico de combustible
Calentamiento	1,86 E-03 Kg/s
80 a 30 % de CH	3,38 E-04 Kg/s
30 a 12 % de CH	5,95 E-04 Kg/s

4.9.1. CANTIDAD DE COMBUSTIBLE TOTAL

Una vez obtenido el flujo de combustible que se tendrá para cada etapa se puede obtener la cantidad de combustible total, esto se obtiene asociando el flujo neto de combustible con el tiempo en cada etapa.

$$V = RC * t_e \quad \text{Ec. (4. 30)}$$

Dónde:

v : Cantidad de combustible para cada etapa (Lt)

RC : Flujo de combustible (Lt/s)

t_e : Tiempo utilizado para cada etapa (s)

$$V = RC * t_e$$

$$V = 0.027 \left(\frac{Lt}{s} \right) * 21240 s$$

$$V = 573.48 Lt$$

Tabla 4. 42 Cantidad de combustible neto por etapas

Etapa	Cantidad de Combustible
calentamiento	39,55 Kg
80 a 30 % de CH	304,94 Kg
30 a 12 % de CH	297,54 Kg
TOTAL	642.03 Kg

4.9.2. CAUDAL MÁSIICO DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN⁸⁷

Con ayuda de la relación entre la masa de los gases y la masa de combustible en la ecuación de combustión y la relación aire combustible calculado anteriormente, se puede calcular el flujo másico de los gases de combustión de la siguiente manera:

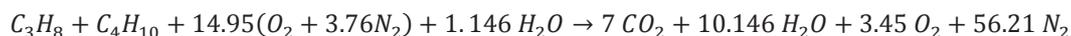
$$\frac{G}{C} = \frac{m_{gases}}{m_{comb}} \quad \text{Ec. (4. 42)}$$

Dónde:

$$\frac{G}{C} : \text{Relación Gases Combustible} \quad (Kg_{aire}/Kg_{comb})$$

m_{aire} : Masa de los gases en la reacción con exceso de aire (Kg)

m_{comb} : Masa de combustible en la reacción con exceso de aire (Kg)



$$\frac{G}{C} = \frac{7kgmol CO_2 + 10.146 kgmol H_2O + 3.45 kgmol O_2 + 56.21kgmol N_2}{(3 Kmol) \left(12 \frac{Kg}{Kmol}\right) + (8 Kmol) \left(1 \frac{Kg}{Kmol}\right) + (4 Kmol) \left(12 \frac{Kg}{Kmol}\right) + (10 Kmol) \left(1 \frac{Kg}{Kmol}\right)}$$

$$\frac{G}{C} = 0.753 \frac{kgmol}{Kg_{comb}} * PM_{gc}$$

$$\frac{G}{C} = 0.753 \frac{kgmol}{Kg_{comb}} * 28,31 \frac{kg gases}{kgmol} = 21.32 \frac{kg gases}{Kg_{comb}}$$

$$\dot{m}_{gc} = \frac{G}{C} * \dot{m}_c$$

$$\dot{m}_{gc} = 21.32 \frac{kg}{Kg_{comb}} * 1,86 E - 03 \frac{Kg_{comb}}{s} = 0.04 \frac{kg}{s}$$

⁸⁷Y. CENGEL, M. BOLES, (2002); *Termodinámica*. México-México DF, McGraw-Hill, pag: 772,

4.9.3. CAUDAL MÁSIICO DE AIRE NECESARIO PARA LA COMBUSTIÓN (AIRE EN EXCESO)⁸⁸

El aire en exceso es el necesario para que la combustión se realice de manera correcta, esta se calcula con ayuda del consumo de combustible que se da en las diferentes etapas de secado.

$$\dot{m}_{aire_{exeso}} = \dot{m}_c * R_{AC} \quad \text{Ec. (4. 30)}$$

Dónde:

$\dot{m}_{aire_{vent}}$: Caudal másico del aire (suministrado por el ventilador) $\left(\frac{Kg}{s}\right)$

\dot{m}_c : Consumo de combustible $2.659E-03 \text{ Kg/s} \left(\frac{Kg}{s}\right)$

R_{AC} : Relación aire combustible $20.21 \left(\frac{Kg_{aire}}{Kg_{comb}}\right)$

$$\dot{m}_{aire_{exeso}} = 1,86 \text{ E} - 03 \frac{Kg_{comb}}{s} * 20.21 \frac{Kg_{aire}}{Kg_{comb}}$$

$$\dot{m}_{aire_{exeso}} = 0.037 \frac{Kg_{aire}}{s}$$

$$\rho_{aire} = 1.16 \frac{kg}{m^3}$$

$$Caudal = 0.032 \text{ m}^3/\text{s}$$

4.10. CÁMARA DE COMBUSTIÓN

La cámara de combustión es el lugar donde se llevará a cabo la quema del combustible para poder usar el calor que se libera durante este proceso, debido a que durante la combustión se producen altas temperaturas es necesario utilizar materiales como el acero inoxidable, además se tiene que el gradiente de temperatura entre el ambiente caliente y frio es alto por lo cual se debe asegurar

⁸⁸Y. CENGEL, M. BOLES, (2002); *Termodinámica*. México-México DF, McGraw-Hill, pag: 772,

un buen aislamiento térmico de la cámara para reducir la pérdida de calor, todo esto se verá reflejado en el consumo de combustible.

4.10.1. CONSUMO DE COMBUSTIBLE⁸⁹

El consumo de combustible depende de la eficiencia de combustión (n_c), como valor aproximado se puede usar $n_c=90\%$. Entonces el consumo de combustible se lo calcula de la siguiente manera.

Tipo de combustible: LPG (Gas licuado de petróleo, principalmente propano y butano)

Contenido energético: 23410 KJ/L= 46000 KJ/Kg⁹⁰.

$$\dot{m}_c = \frac{\dot{Q}_M}{PC * n_c} \quad \text{Ec. (4. 31)}$$

Dónde:

\dot{m}_c : Requerimiento de combustible (Kg/s)

\dot{Q}_{cal} : Calor máximo que se requiere (KW)

PC : Poder calórico del combustible(KJ/L)

n_t : Eficiencia térmica de la cámara de combustión (%)

n_c : Eficiencia de combustión de la cámara de combustión (%)

$$RC = \frac{85.66 (KW)}{46000 \left(\frac{KJ}{kg}\right) * 0.9}$$

$$RC = 0.00207 \left(\frac{Kg}{s}\right)$$

⁸⁹Y. CENGEL, M. BOLES, (2002); *Termodinámica*. México-México DF, McGraw-Hill, pag: 772,

⁹⁰<http://www.stilar.net/Archivos%20Web/Gas%20natural.pdf>

Tabla 4. 43 Caudal requerido de combustible para cada etapa

Etapa	Masa de combustible (Kg)	Flujo másico (Kg/s)
Calentamiento	43.95	2.07E-03
80 a 30 % de CH	262.61	2.92E-04
30 a 12 % de CH	159.34	3.21E-04

4.10.2. VOLUMEN DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN

Para determinar el volumen de combustión se debe considerar que este es proporcional al volumen de los gases de combustión, por lo tanto también es proporcional a la masa de combustible.

Se puede utilizar varias relaciones entre volumen y producción energética pero el rango más satisfactoria para cámaras de combustión es el de $250000 \text{ Kcal/h} * \text{m}^3$ ($1046000 \text{ KJ/h} * \text{m}^3$).⁹¹

Entonces el volumen de la cámara de combustión se lo puede encontrar de la siguiente manera.

$$V_{CC} = \frac{\dot{m}_c * PC}{1046000 \left(\frac{\text{KJ}}{\text{h} * \text{m}^3} \right)}$$

Dónde:

V_{CC} : Volumen de la cámara de combustión (m^3)

\dot{m}_c : Flujo másico de combustible (Kg/s)

PC : Poder calórico del gas (KJ/Kg)

$$V_{CC} = \frac{2.07 * E - 3 \left(\frac{\text{Kg}}{\text{s}} \right) * 46000 \left(\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right)}{1046000 \left(\frac{\text{KJ}}{\text{h} * \text{m}^3} \right) * \left(\frac{\text{h}}{3600\text{s}} \right)}$$

⁹¹ P. GONZALEZ. Rediseño y adecuación de un horno de secado para el proceso de pintado epóxido de multiplacas con una temperatura 170 °C. Tesis. Sangolqui. Ecuador.

$$V_{CC} = 0.33 \text{ m}^3$$

El volumen y la forma de la cámara de combustión determinarán las dimensiones de la misma.

4.10.3. FORMA DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN

Para la forma de la cámara de combustión se debe tener en cuenta que debe existir un espacio en el cual se produzca la mezcla aire combustible la cual se dará en el interior del quemador. Además se debe considerar la facilidad de construcción así que se le va a dar una forma plana a las paredes.

La configuración para las paredes de la cámara de combustión será una lámina de acero inoxidable en el interior de la cámara de 1.5 mm de espesor seguida por el material aislante lana de vidrio 1" de espesor y al final una lámina de acero inoxidable **Figura 4.30**.

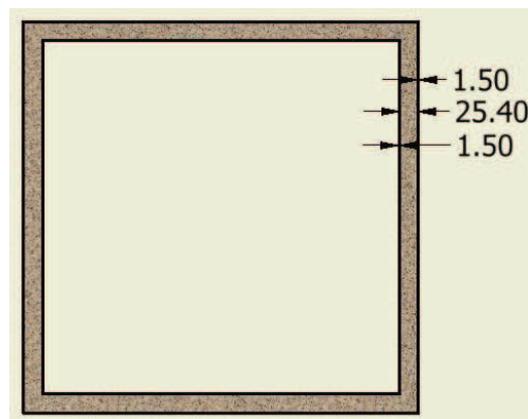


Figura 4. 30 Configuración de las paredes de la cámara de combustión

En el interior de la cámara de combustión debe ir el quemador de gas esto también será determinante al momento de dar las dimensiones.

El quemador a utilizar será uno de llama continua la selección de este quemador es debido a que este es el más utilizado en hornos de pintura, hornos de enlosado y hornos para secado de madera.

Este quemador es capaz de producir hasta 240 000 *Kcal/hora* (278.93 KW) que está por encima de lo requerido para este proyecto, las dimensiones se muestra en la **Figura 4.31**. Para cumplir con el volumen de la cámara y asegurar que el quemador ingrese a la cámara de combustión se consideran las siguientes dimensiones largo 1.2 metros ancho 0.5 metros y alto 0.6 metros.

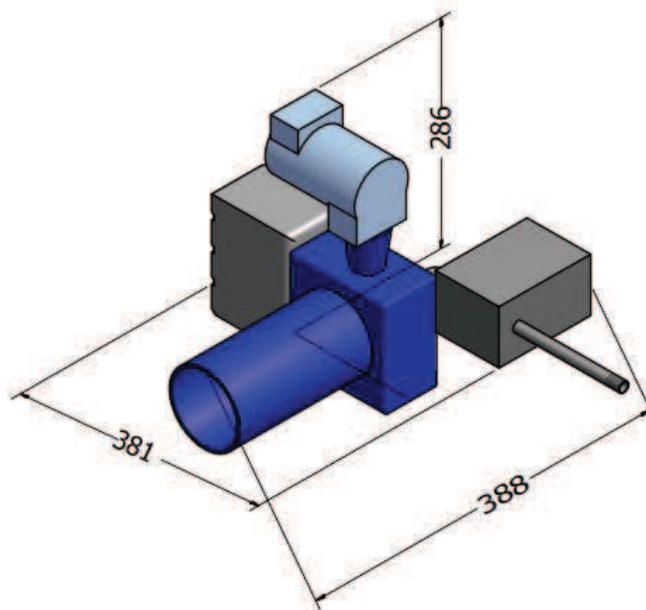


Figura 4. 31 Esquema del quemador de Gas para el horno

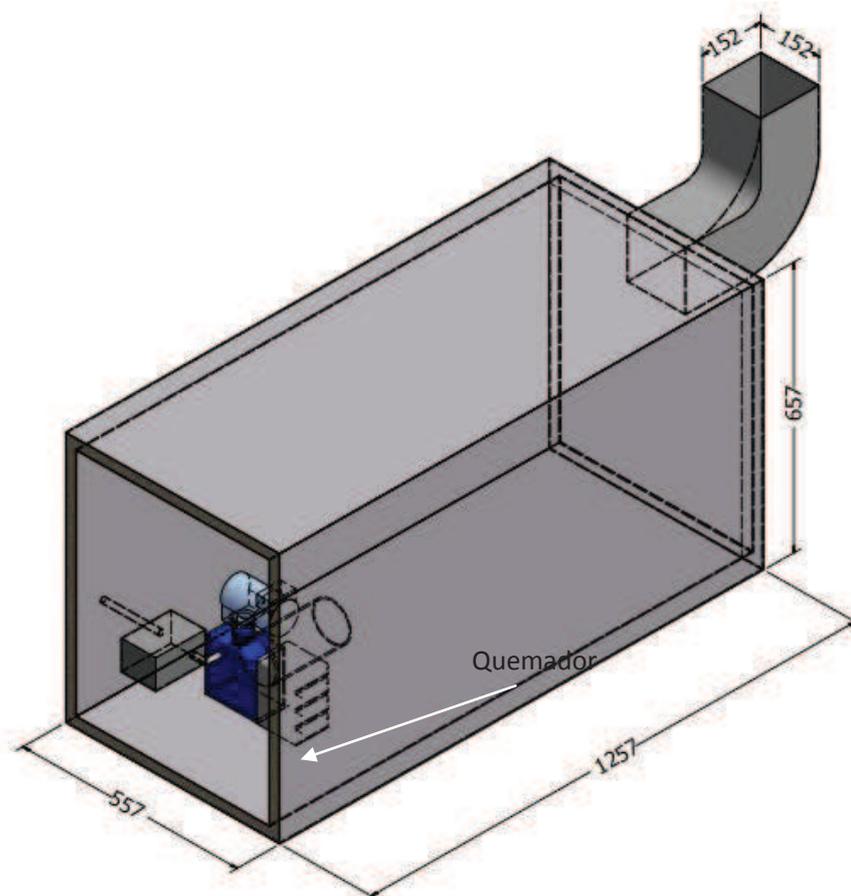


Figura 4. 32 Cámara de combustión

4.10.4. CHIMENEA ⁹²

La evacuación de los gases de combustión en la cámara de combustión se realizará mediante un ducto que será construido de tol galvanizado que es liviano resistente a la corrosión producto de los gases de combustión, además de que este material ofrece baja resistencia al flujo de gases.

El flujo de los gases es por tiro natural cuyo principio es la diferencia de densidades entre dos columnas de gas de igual altura una de ellas es la columna de gases calientes dentro de la chimenea cuya densidad es menor que la del aire frío atmosférico. Entonces el aire atmosférico tiende a reemplazar a los gases de

⁹² P. GONZALEZ. Rediseño y adecuación de un horno de secado para el proceso de pintado epóxico de multiplacas con una temperatura 170 °C. Tesis. Sangolqui. Ecuador.

la chimenea que tienden a elevarse. Para este caso de tiro natural se puede aplicar la ecuación de Bernoulli.

$$\frac{P_1}{\gamma_1} + \frac{V_1}{2} g + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma_2} + \frac{V_2^2}{2} g + Z_2 + \text{Perdidas}_{1-2} \quad \text{Ec. (4. 32)}$$

Dónde:

P : Presión en el punto de estudio (Pa)

γ : Peso específico del fluido en el punto de estudio (m^3/Kg)

V : Velocidad del fluido en el punto de estudio (m/s)

z : Coordenada de altura en el punto de estudio (m)

Perdidas_{1-2} : Sumatorias de pérdidas en trayecto de 1 a 2 (m)

Suposiciones

La velocidad de entrada del fluido es cero pero salen a una determinada velocidad

Las presiones son las mismas en el punto 1 y 2

Los puntos 1 y 2 están al mismo nivel diferencia de alturas es cero, entonces se tiene.

$$\rho_1 g h_1 = \rho_2 g h_2 + \rho_2 \frac{V_2^2}{2} + \text{Perdidas}_{1-2}$$

$$\text{Tiro} = gh (\rho_1 - \rho_2) = \rho_2 \frac{V_2^2}{2} + \text{Perdidas}_{1-2}$$

De la ecuación anterior se puede concluir que el flujo de los gases es producto por la diferencia de peso de las columnas de gases.

$$h = \frac{\rho_2 \frac{V_2^2}{2} + \text{Perdidas}_{1-2}}{g(\rho_1 - \rho_2)} \quad \text{Ec. (4. 33)}$$

Dónde:

V_2 : Velocidad de los gases de escape en la chimenea (m/s)

ρ_1 : Densidad del aire atmosférico a las condiciones de Quito (Kg/m^3)

ρ_2 : Densidad de los gases de combustión (Kg/m^3)

h : Altura mínima de la chimenea (m)

La velocidad de los gases de combustión dependerá del flujo másico y del área del ducto de transporte.

$$V_g = \frac{\dot{m}_g}{A \cdot \rho_g} \quad \text{Ec. (4. 34)}$$

Dónde:

V_g : Velocidad de los gases de combustión (m/s)

A : Área del ducto de transporte de gases, ducto cuadrado de 150x150 mm(m^2)

\dot{m}_g : Flujo másico de los gases de combustión (Kg/s)

ρ_g : Densidad de los gases de combustión (Kg/s)

$$V = \frac{0.04 \text{ Kg/s}}{0.0225 \text{ (m}^2\text{)} * 0.18 \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}\right)}$$

$$V = 9.88 \frac{m}{s}$$

$$h = \frac{0.18 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * \frac{(9.88 \frac{m}{s})^2}{2} + 0.76 \frac{\text{Kg}}{\text{m} * \text{s}}}{9.8 \frac{m}{s^2} (1.1614 - 0.18) \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}}$$

$$h = \frac{9.54}{9.61} m$$

$$h = 0.99 m \approx 1 m$$

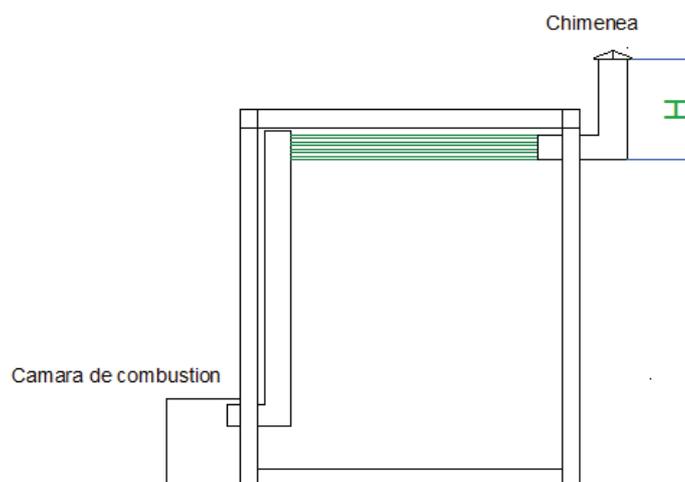


Figura 4. 33 Esquema de la chimenea

4.11. DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

En aplicaciones industriales como es el caso del horno se utilizan intercambiadores de calor de flujo cruzado, en este el aire fluye en forma perpendicular a los tubos por los cuales fluyen los gases productos de la combustión.

Para determinar la temperatura de salida de los gases se utiliza los balances globales de energía.⁹³

$$q_{max} = q_{gc} \quad \text{Ec. (4. 49)}$$

$$85660 \text{ W} = \dot{m}_{gc} C_{p_{gc}} \Delta T$$

$$85660 \text{ W} = 0.04 \frac{\text{kg}}{\text{s}} 1341,39 \frac{\text{J}}{\text{Kg } ^\circ\text{K}} (1077,35 - T_{sgc})$$

$$T_{sgc} = 519,13 \text{ } ^\circ\text{C}$$

El calor necesario para el calentamiento es el mayor en todas las etapas e igual a 85,66 Kw, este calor será utilizado para el diseño del intercambiador de calor, y aplicando un factor de seguridad del 20% con lo que se tiene:

$$\dot{Q} = 102,79 \text{ Kw}$$

⁹³ F. INCROPERA, D. DEWITT, *Fundamentos de transferencia de calor*, México, Prentice Hall, 1999, Pág. 79.

Tabla 4. 44 Propiedades del aire y de los gases

AIRE	GASES CALIENTES
$T_{e_{\text{aire}}} = 14 \text{ } ^\circ\text{C}$	$T_{e_{\text{gc}}} = 1077,53 \text{ } ^\circ\text{C}$
$T_{s_{\text{aire}}} = 60 \text{ } ^\circ\text{C}$	$T_{s_{\text{gc}}} = 519,13 \text{ } ^\circ\text{C}$
$m_{\text{aire}} = 6,57 \text{ kg/s}$	$m_{\text{gc}} = 0.04 \text{ kg/s}$
$C_{p_{\text{aire}}} = 1007 \frac{\text{J}}{\text{Kg } ^\circ\text{K}}$	$C_{p_{\text{gc}}} = 1341,39 \frac{\text{J}}{\text{Kg } ^\circ\text{K}}$
$u_{\text{aire}} = 1.854\text{E} - 05 \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}$	$u_{\text{gc}} = 5,79\text{E} - 05 \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}$
$\rho_{\text{aire}} = 1.1614 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$\rho_{\text{gc}} = 0.180 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
$K_{\text{aire}} = 2.624\text{E} - 02 \frac{\text{W}}{\text{m } ^\circ\text{K}}$	$K_{\text{gc}} = 0,0917 \frac{\text{W}}{\text{m } ^\circ\text{K}}$
$Pr_{\text{aire}} = 0.708$	$Pr_{\text{gc}} = 0,847$

Para el diseño del intercambiador se utilizará la teoría de la diferencia de temperatura media logarítmica (ΔT_{ml}).⁹⁴

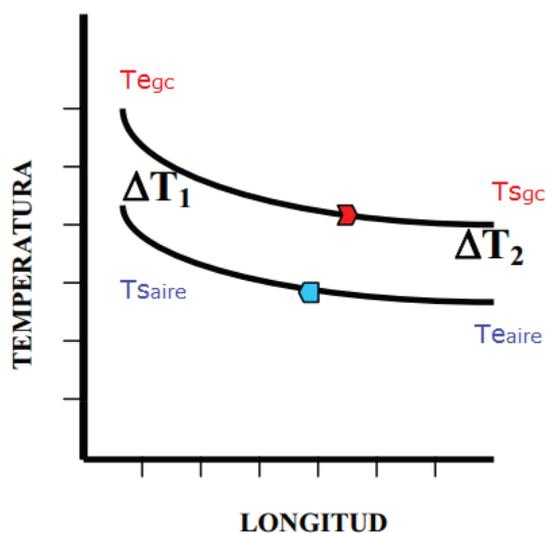


Figura 4. 34 Gráfico de Temperatura vs longitud del intercambiador.⁹⁵

⁹⁴ F. INCROPERA, D. DEWITT, *Fundamentos de transferencia de calor*, México, Prentice Hall, 1999, Pág. 79.

⁹⁵ https://www5.uva.es/guia_docente/uploads/2011/447/42501/1/Documento15.pdf

$$\dot{Q} = U_o * A * \Delta T_{mlr} \quad \text{Ec. (4. 50)}$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)} \quad \text{Ec. (4. 51)}$$

$$\Delta T_1 = T_{e_{gc}} - T_{s_{aire}} \quad \text{Ec. (4. 52)}$$

$$\Delta T_2 = T_{s_{gc}} - T_{e_{aire}} \quad \text{Ec. (4. 53)}$$

$$\Delta T_{mlr} = F * \Delta T_{ml} \quad \text{Ec.(4. 54)}$$

Dónde:

Q : Calor neto máximo necesario (W)

A : Área superficial total para la transferencia de calor (m^2)

ΔT_{mlr} : Diferencia de temperatura media logarítmica real (—)

U_o : Coeficiente global de transferencia de Calor [$W/(m^2 \cdot K)$]

F : Factor de corrección para un intercambiador de calor de flujo cruzado de un solo paso con ambos fluidos no mezclados (—)

$$\Delta T_1 = 1017,53 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_2 = 505,13 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{ml} = 731,67 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Para determinar el factor de corrección F se utiliza una gráfica y las siguientes ecuaciones⁹⁶:

$$Z = \frac{T_{e_{aire}} - T_{s_{aire}}}{T_{s_{gc}} - T_{e_{gc}}} = 0,08 \quad \text{Ec. (4. 55)}$$

⁹⁶ F. INCROPERA, D. DEWITT, *Fundamentos de transferencia de calor*, México, Prentice Hall, 1999, Pág. 593,594.

$$y = \frac{T_{s_{gc}} - T_{e_{gc}}}{T_{e_{aire}} - T_{e_{gc}}} 0,52 \quad \text{Ec. (4. 56)}$$

$$F = 0,99$$

$$\Delta T_{mlr} = 724,35 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Para el cálculo del área se supone un coeficiente global de transferencia de calor $U = 30 \text{ W/m}^2\text{K}$, debido que para casos de aire- gases el coeficiente varía entre $10\text{-}50 \text{ W/m}^2\text{K}$ ⁹⁷

$$A = \frac{\dot{Q}}{U_o * \Delta T_{mlr}}$$

$$A = 4,73 \text{ m}^2$$

Para calcular en número de tubos que tendrá el intercambiador se debe tener la especificación de la tubería a utilizar, en este caso se utilizara un acero al carbono usado usualmente en la construcción de calderas.

Tabla 4. 45 Especificaciones de la tubería a utilizar

TUBERIA	1"	
	pulg.	m
CEDULA	40	
D	1,315	0,033401
d	1,049	0,0266446
espesor	0,133	0,0033782
L	3	
K	60,5	W/m [°] K

Y con la ayuda de la siguiente ecuación:

$$A = n_{tubos} * \pi * D * L \quad \text{Ec. (4. 57)}$$

$$n_{tubos} = 15,02 = 15$$

⁹⁷<http://www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r92979.PDF>

A continuación se escogerá la distribución de tubos con ayuda de la siguiente figura:

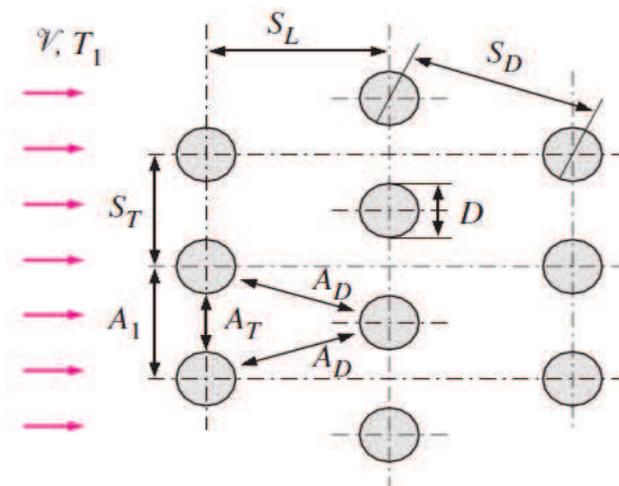


Figura 4. 35Arreglo de los tubos escalonados

Dónde:

s_T : Paso transversal

s_L : Paso longitudinal

Los tubos estarán espaciados 1,25 veces el diámetro exterior del tubo⁹⁸

$$s_T = s_L = 1,25 * D = 1,25 * 0,033401 \quad \text{Ec. (4. 58)}$$

$$s_T = s_L = 0,04175 \text{ m}$$

Ya calculado s_T se puede calcular s_D .⁹⁹

$$s_D = \sqrt{(s_L)^2 + \left(\frac{s_T}{2}\right)^2} = 0,0466 \text{ m.} \quad \text{Ec. (4. 59)}$$

Para encontrar el plano donde se produce la velocidad máxima se cumple para A_D

si $s_D < \frac{s_T + D}{2}$ donde:

⁹⁸ F. INCROPERA, D. DEWITT, *Fundamentos de transferencia de calor*, México, Prentice Hall, 1999, Pág. 79.

⁹⁹ F. INCROPERA, D. DEWITT, *Fundamentos de transferencia de calor*, México, Prentice Hall, 1999, Pág. 79.

$$0,0466 < 0,0375$$

Debido a que la velocidad máxima se da en el plano A_1 , se calcula V_{max} con ayuda de la siguiente ecuación:¹⁰⁰

$$V_{max} = \frac{s_T}{s_T - D} V_{aire} \quad \text{Ec. (4. 60)}$$

Para el cálculo de la velocidad del aire se utiliza el flujo másico calculado antes.¹⁰¹

$$V_{aire} = \frac{\dot{V}}{A} \quad \text{Ec. (4. 61)}$$

$$V_{aire} = \frac{5,66 \frac{m^3}{s}}{(3,7 \times 0,5) m^2} = 3,05 \frac{m}{s} \quad \text{Ec. (4. 62)}$$

$$V_{max} = 15,25 \frac{m}{s}$$

Cálculo de Reynolds para el aire¹⁰²

$$Re_{Dmax} = \frac{\rho_{aire} * V_{max} * D}{\mu_{aire}} = 3,20E + 04 \text{ (F. Turbulento)} \quad \text{Ec. (4. 63)}$$

Cálculo de Nusselts para el aire¹⁰³

Para un flujo de aire de aire a través de haces de tubos compuestos de 10 o más líneas, Grimison obtuvo una correlación de la forma:

$$Nu_D = 1,13 C_1 Re_{Dmax}^m \quad \text{Ec. (4. 64)}$$

Si $2000 < Re_{Dmax} < 40000$, $N_L > 10$ y $Pr > 0,7$.

Para las condiciones de $\frac{s_T}{D} = \frac{s_L}{D} = 1,25$ se obtiene:

¹⁰⁰ F. INCROPERA, D. DEWITT, *Fundamentos de transferencia de calor*, México, Prentice Hall, 1999, Pág. 79.

¹⁰¹ R. CALLE, J. APARICIO, *Diseño de una planta de deshidratación de yerbas aromáticas*, Ecuador, E.P.N., 2011, Pág. 61.

¹⁰² F. INCROPERA, D. DEWITT, *Fundamentos de transferencia de calor*, México, Prentice Hall, 1999, Pág. 79.

¹⁰³ F. INCROPERA, D. DEWITT, *Fundamentos de transferencia de calor*, México, Prentice Hall, 1999, Pág. 79.

$$C_1 = 0,518$$

$$m = 0,556$$

$$Nu_D = 187,33$$

La ecuación precedente de Nu_D están evaluadas a la temperatura de película. Si $Nu_L < 10$ se aplica un factor de corrección C_2 tal que:

$$\overline{Nu}_D = C_2 Nu_D$$

Para un arreglo de tubos de 5 x 3 tenemos un $C_2=0,83$

$$\overline{Nu}_D = 130,44$$

Cálculo del coeficiente de transferencia de calor para el aire¹⁰⁴

$$Nu_D = \frac{h_{aire} * D}{K_{aire}} \quad \text{Ec. (4. 65)}$$

$$h_{aire} = 102,47 \frac{W}{m^2 \circ K}$$

Cálculo de Reynolds para los gases de combustión¹⁰⁵

$$Re_{gc} = \frac{4 * m_{gc}}{n_{tubos} * \pi * d * u_{gc}} = 2195,39 \text{ (F. Turbulento)} \quad \text{Ec. (4. 66)}$$

Cálculo de Nusselts para los gases de combustión¹⁰⁶

Para flujo Turbulento en tubos se debe cumplir

$$Nu_{gc} = 0,023 (Re_{gc})^{4/5} * (Pr)^{0,3} \quad \text{Ec. (4. 67)}$$

$$Nu_{gc} = 10,31$$

¹⁰⁴ F. INCROPERA, D. DEWITT, *Fundamentos de transferencia de calor*, México, Prentice Hall, 1999, Pág. 79.

¹⁰⁵ F. INCROPERA, D. DEWITT, *Fundamentos de transferencia de calor*, México, Prentice Hall, 1999, Pág. 79.

¹⁰⁶ F. INCROPERA, D. DEWITT, *Fundamentos de transferencia de calor*, México, Prentice Hall, 1999, Pág. 79.

El número de Reynolds para los gases depende del número de tubos que tenga el intercambiador por lo que se supone que para la segunda iteración el flujo se podría volver laminar y para este caso tenemos:

$$Nu_{gc} = 1,86 \left(\frac{Re_{gc} * Pr_{gc}}{L/d} \right)^{1/3} * \left(\frac{u_{gc}}{u_s} \right)^{0,14} \quad \text{Ec. (4. 68)}$$

$$Nu_{gc} = 5,15$$

Debe cumplir que $0,48 < Pr < 16700$ y $0,0044 < \left(\frac{u_{gc}}{u_s} \right) < 9,75$ donde u_s es evaluada a T_s .

$$\frac{u_{gc}}{u_s} = 1,82 \quad \text{Ec. (4. 69)}$$

Cálculo del coeficiente de transferencia de calor para los gases¹⁰⁷

$$Nu_D = \frac{h_{gc} * D}{K_{gc}} \quad \text{Ec. (4. 70)}$$

$$h_{gc} = 17,74 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor.¹⁰⁸

Este coeficiente se define en términos de la resistencia total para la transferencia de calor:

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_{aire}} \right) + \left(\frac{1}{h_{gc}} \right)} \quad \text{Ec. (4. 71)}$$

$$U = 15,12 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°K}$$

El valor de $26,05 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°K}$ se obtuvo al ingresar un valor de $30 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°K}$, con el nuevo valor del coeficiente global de transferencia de calor se obtiene nuevos valores lo cual de acuerdo a las siguientes iteraciones se obtiene los siguientes datos:

¹⁰⁷ F. INCROPERA, D. DEWITT, *Fundamentos de transferencia de calor*, México, Prentice Hall, 1999, Pág. 79.

¹⁰⁸ F. INCROPERA, D. DEWITT, *Fundamentos de transferencia de calor*, México, Prentice Hall, 1999, Pág. 79.

Tabla 4. 46 Resultados de datos obtenidos en las iteraciones.

Q KW	U_o (asumido) $W/m^2 \text{ } ^\circ K$	A m^2	n_{tubos}	Re_{Dmax}	$\frac{h_{aire}}{W}$ $m^2 \text{ } ^\circ K$	Re_{gc}	$\frac{h_{gc}}{W}$ $m^2 \text{ } ^\circ K$	U_o (final) $W/m^2 \text{ } ^\circ K$
102,79	30	4,73	15	3,20E+04	102,47	2195	17,74	15,12
102,79	15,12	9,38	30	3,20E+04	113,58	1106,4	14,12	12,56
102,79	12,56	11,29	36	3,20E+04	113,58	919,13	13,27	11,88
102,79	11,88	11,94	38	3,20E+04	113,58	868,37	13,03	11,6
102,79	11,6	12,23	39	3,20E+04	113,58	848,88	12,92	11,6

Por lo tanto se escoge 40 tubos con una distribución de 10 filas por 4 columnas.

CAPÍTULO 5

SELECCIÓN DE EQUIPOS Y MATERIALES NECESARIOS PARA LA INSTALACIÓN DEL HORNO

En este capítulo se seleccionarán los equipos, instrumentación y accesorios necesarios para el funcionamiento del horno, tales como ventiladores, humidificadores, quemadores, etc.

5.1. VENTILADORES

Para la selección de los ventiladores se calcula las caídas de presión en el intercambiador de calor y en la pila de la madera, tomando en cuenta que el caudal necesario de $5,66 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)$ (11992,87 CFM).

Caída de presión en el intercambiador de calor¹⁰⁹

Para el cálculo de la pérdida de presión en el intercambiador de calor se utiliza la siguiente ecuación:

$$\Delta P_i = N_L * x \frac{\rho_{\text{aire}} * V_{\text{max}}^2}{2} f \quad \text{Ec. (5. 35)}$$

Dónde:

ΔP_i = Caída de presión en el intercambiador [mm H₂O]

N_L = Numero de columnas del arreglo del banco de tubos [-]

x = Factor de correlación [-]

f = Factor de fricción [-]

El factor de fricción se representa en forma gráfica en la **Figura 5.1** y de igual manera el factor de correlación se representa en el recuadro de la **Figura 5.1**, que pertenecen a un arreglo escalonado de tubos.

¹⁰⁹ F. INCROPERA, D. DEWITT, *Fundamentos de transferencia de calor*, México, Prentice Hall, 1999, Pág. 382, 383.

Donde $PT=ST/D$, y para este caso $PT=1,25$ y sabiendo que $PT=PL$ y de cálculos anteriores se tiene que el número de Reynolds es igual a $3,20E+04$ se obtiene:

$$x = 1,05$$

$$f = 0,6$$

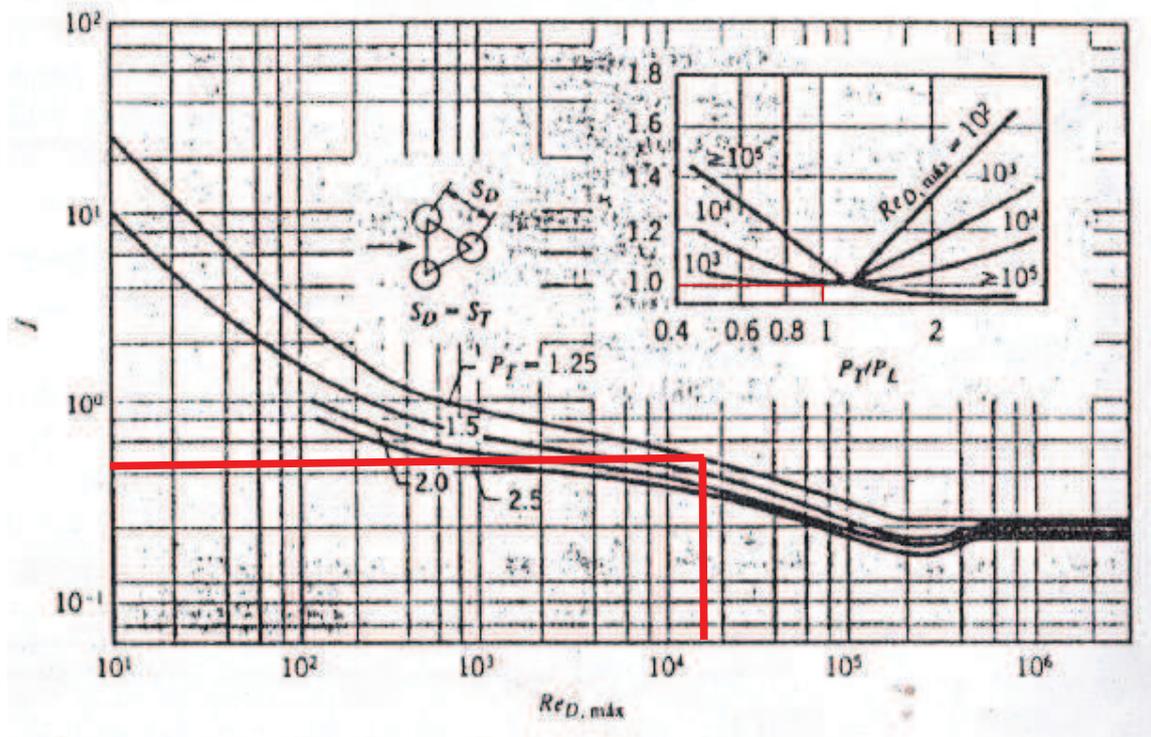


Figura 5. 1 Factor de fricción y factor de correlación para un arreglo escalonado ¹¹⁰

Con los factores se procede a calcular la caída de presión en el intercambiador de calor.

$$\Delta P = 5 * 1,05 \frac{1.1614 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * (15,25 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{2} 0,6$$

$$\Delta P = 340,32 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 34,72 \text{ mm H}_2\text{O}$$

¹¹⁰ F. INCROPERA, D. DEWITT, *Fundamentos de transferencia de calor*, México, Prentice Hall, 1999, Pág. 383.

5.2. CAÍDA DE PRESIÓN EN LA PILA DE MADERA ¹¹¹

Se procede a calcular la caída de presión en la pila con la siguiente ecuación:

$$\Delta P_m = \frac{1000 F \lambda b v^2 r}{2 s g} \quad \text{Ec. (5. 2)}$$

Dónde:

ΔP_m = Caída de presión en la pila de madera

F = Profundidad de las pilas del recorrido del aire [5,5 m]

λ = Factor de aspersiones de la madera [0,06]

b = anchura de la pila [2,5m]

v = velocidad del aire [$1,2 \frac{m}{s}$]

s = espesor de los separadores [30 mm]

r = peso específico del aire [$\frac{Kg}{m^3}$]

g = gravedad [$9,8 \frac{m}{s^2}$]

Para este cálculo se necesita el peso específico del aire.

$$r = \frac{P}{286(273 + T_m)}$$

Donde

P = Presión atmosférica de Quito (Pa)

T_m = Temperatura media del aire en el secador (°C)

$$r = \frac{71700}{286(273 + 49)}$$

$$r = 0.7785 \text{ kg/m}^3$$

$$\Delta P_m = \frac{1000 \times 5.5 \text{ m} \times 0.06 \times 2,5 \text{ m} \times \left(\frac{1.2 \text{ m}}{s}\right)^2 \times 0,7785 \text{ kg/m}^3}{2 \times 30 \text{ mm} \times 9.8 \text{ m/s}^2}$$

¹¹¹ R. REINOSO, Y. CHAPALBAY, *Diseño y simulación de un secador de flujo forzado para madera permeable utilizando un quemador de biomasa*, Sangolquí, 2011.

$$\Delta P_m = 1,57 \text{ mm H}_2\text{O} = 15,38 \text{ Pa}$$

$$\Delta P = \Delta P_m + \Delta P_i = 36,29 \text{ mm H}_2\text{O} = 1,42 \text{ in H}_2\text{O}$$

El caudal necesario para el proceso es de 11992,87 CFM por lo cual se escoge 3 ventiladores de un aproximado de 4000 CFM y que puedan superar las pérdidas calculadas.

A continuación con ayuda de las curvas características de los ventiladores y el caudal calculado se seleccionará el ventilador adecuado.¹¹²

HXB-T

EXTRACTORES AXIALES
400,500 y 630 mm. de diámetro

CURVAS CARACTERÍSTICAS

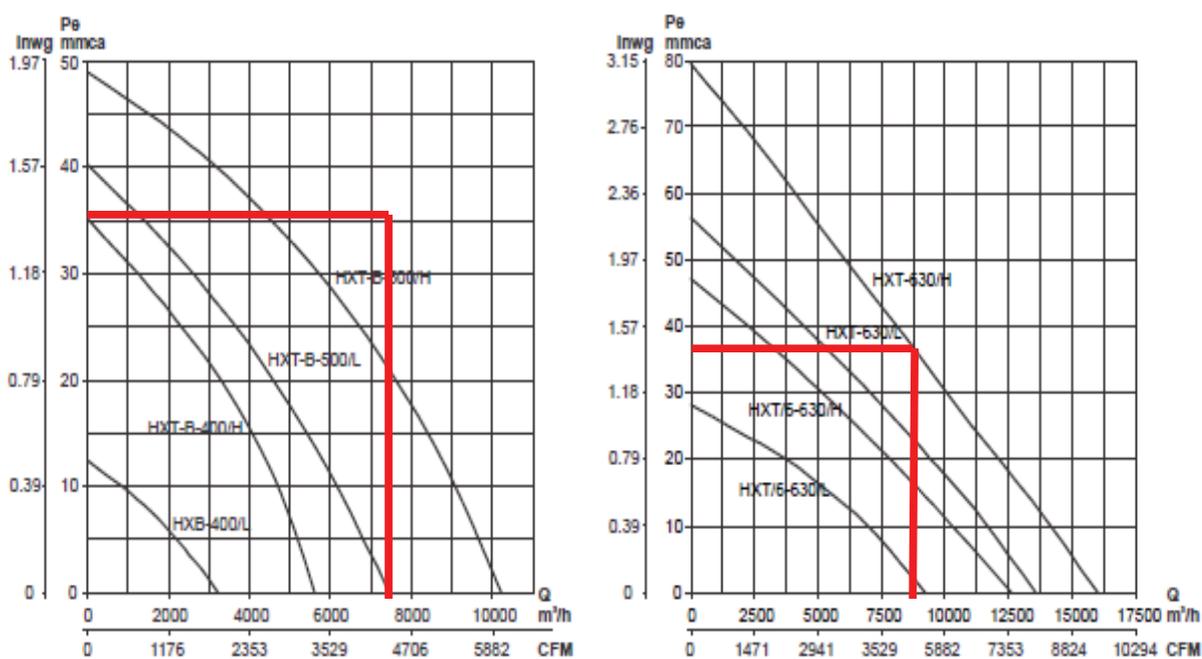


Figura 5. 2 Curvas características de los ventiladores¹¹³

¹¹²<http://www.megafrio.com.mx/n/>

¹¹³<http://www.megafrio.com.mx/n/>

Con las curvas característica se determinan los ventiladores que cumplen los requerimientos por lo cual se escoge el modelo HXT/6-630/H. Las características técnicas del ventilador se pueden observar en el ANEXO 1



Figura 5. 3 Ventiladores axiales HXT/6-630/H

5.3. SELECCIÓN DEL QUEMADOR

El quemador se seleccionara en base a la potencia máxima requerida en el proceso el cual es 102,79Kw (350734.08 Btu/hr), por lo tanto se escoge un quemador Wayne HSG 400 que tiene una potencia entre 60 000 a 400 000 Btu/hr según especificaciones del ANEXO 1.

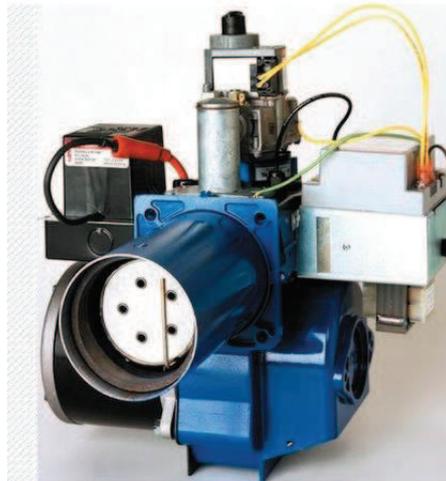


Figura 5. 4 Quemador seleccionado.¹¹⁴

¹¹⁴<http://www.waynecombustion.com/images/gallery/Catalog%20Page-46886G%20WCS%20P250.pdf>

Este quemador cuenta con un esparcidor de llama ajustable para permitir la adaptación de la forma de la llama a la cámara de combustión.¹¹⁵

5.4. SELECCIÓN DE LOS HUMIDIFICADORES

La humidificación se la realizara mediante vapor de agua, el cual tendrá que estar a una temperatura de 43,5 °C.

Con ayuda de la carta psicrometrica se calcula la cantidad de vapor de agua que tendrá que adicionarse al aire para humidificarlo.

Como se puede observar en la figura 5.5 primero se calienta el aire del exterior a 43,5 °C (1-2) y después se humedece mediante la inyección de vapor hasta 90% de HR(2-3).

La cantidad de vapor de agua en el proceso se la calculara con ayuda de la siguiente ecuación:

$$m_w = m_{as}(w_3 - w_2)$$

Dónde:

m_{as} : Masa de aire seco (Kg)

m_w : Masa de agua (Kg)

w : Humedad especifica $\left(\frac{\text{Kg de vapor de agua}}{\text{Kg de aire seco}}\right)$

$$m_w = 6,57 \frac{\text{Kg aire}}{\text{s}} (0,079 - 0,01) \frac{\text{Kg de vapor de agua}}{\text{kg aire}}$$

$$m_w = 0,453 \frac{\text{Kg de vapor de agua}}{\text{s}} = 1631,98 \frac{\text{Kg de vapor de agua}}{\text{h}}$$

¹¹⁵<http://www.waynecombustion.com/images/gallery/Catalog%20Page-46886G%20WCS%20P250.pdf>

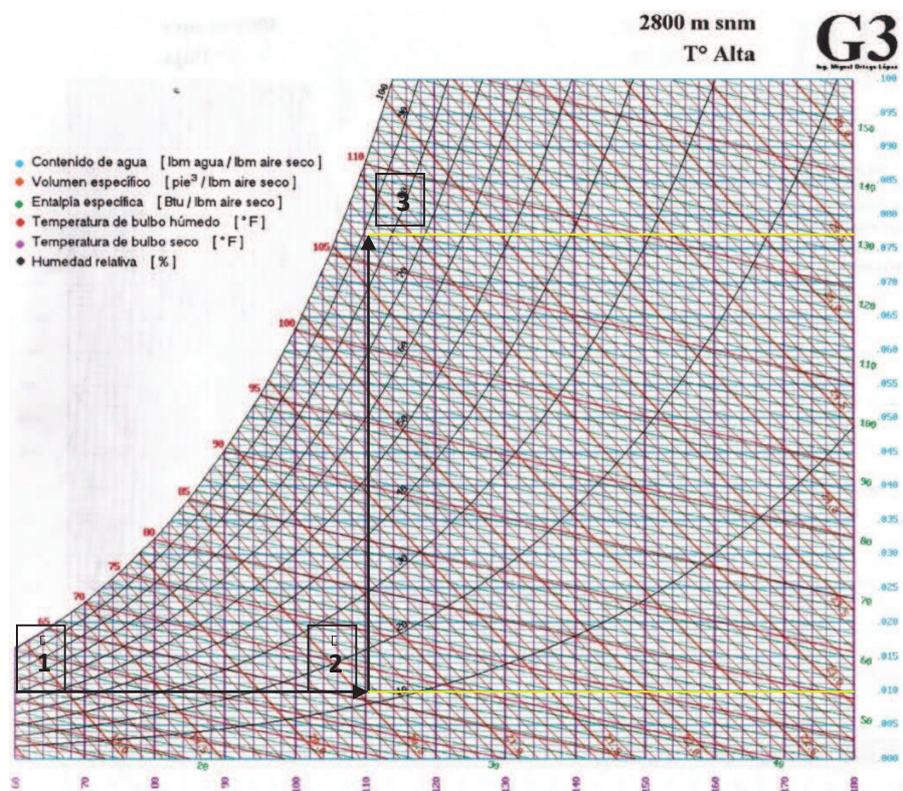


Figura 5. 5 Esquema del proceso de calentamiento¹¹⁶

Una vez calculado el flujo de vapor de agua para humidificar el aire el cual es de 1631,98 Kg vapor de agua/h a una temperatura de 43,5 se selecciona el equipo que cumple con las características por lo cual se escoge el sistema de humidificación a gas Condair GS.

Por lo tanto se escoge un sistema de humidificación que cumpla con las características de un flujo de 1631,98 Kg vapor de agua/h a una temperatura de 43,5°C, por lo cual se selecciona el sistema a gas Condair GS (**Figura 5.6**) que cumple con las características requeridas, las especificaciones técnicas de este equipo se las puede ver en el ANEXO 1.¹¹⁷

¹¹⁶M. ORTEGA, A. PEÑA; *Cartas Psicrométricas*. Ecuador, E.P.N

¹¹⁷<http://www.jshumidificadores.com.ar/condair-gs-humidificador-de-vapor-a-gas-834-details/>



Figura 5. 6 Sistema de humidificación Condair Gs¹¹⁸

Este sistema posee una tubería de distribución múltiple que provee vapor a todo el ducto como se puede ver en la **Figura 5.7**.



Figura 5. 7 Tubería corta para evaporación de vapor¹¹⁹

5.5. SELECCIÓN DE LAS VENTILAS

La función de las ventilas es permitir la entrada y salida del aire entre el interior y el exterior del horno el cual es regulable con la ayuda de un dámper.

¹¹⁸<http://www.jshumidificadores.com.ar/condair-gs-humidificador-de-vapor-a-gas-834-details/>

¹¹⁹<http://www.jshumidificadores.com.ar/condair-gs-humidificador-de-vapor-a-gas-834-details/>



Figura 5. 8 Ventila¹²⁰

5.5.1. Dimensionamiento de las ventilas

Conociendo el caudal necesario de entrada y salida del aire y con ayuda de la **Tabla 5.1** se selecciona las dimensiones del área transversal.

Para un flujo de $5,66 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 20376 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$ se escogerá 2 ventilas por la cual pasará un caudal de $10188 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$

Tabla 5. 1 Dimensiones del área transversal de las ventilas.¹²¹

Dimension	Flow(l/s)	Flow(m3/h)	Error(±%)	Min. pressure(Pa)
200 x 100	44	159	<10	100
	79	286	<10	100
	113	405	<10	100
	156	563	<10	100
	185	677	<8	100
300 x 200	127	458	<10	100
	238	855	<10	100
	323	1161	<10	100
	438	1578	<8	100
	531	1912	<8	100
400 x 250	210	756	<10	100
	304	1113	<10	100
	404	1454	<10	100
	504	1813	<10	100
	604	2172	<8	100
500 x 500	723	2601	<8	100
	880	3167	<8	100
	1037	3727	<10	100
	1194	4287	<10	100
	1351	4847	<10	100
600 x 600	1508	5408	<5	100
	1770	6371	<5	100
	2032	7334	<10	100
	2294	8297	<10	100
	2556	9260	<8	100
	2990	10763	<5	100

Por lo tanto las ventilas tendrán un área transversal de 600x600 mm.

¹²⁰<http://spanish.alibaba.com/product-gs/hvac-damper-constant-air-volume-control-damper-738526807.html>

¹²¹<http://spanish.alibaba.com/product-gs/hvac-damper-constant-air-volume-control-damper-738526807.html>

5.6. DEFLECTORES

Los deflectores son láminas de metal, que permiten dirigir el flujo de aire impulsado por los ventiladores hacia la pila de madera y así proporcionar un caudal uniforme, utilizando deflectores se logra aprovechar el aire y mejorar la capacidad de secado del horno.

Los deflectores serán de forma curva como se muestra en la **Figura 5.8** ocupando un cuarto de circunferencia de la sección transversal del ducto de ventilación. Para ello se utilizará como material, aluminio, el que presenta buenas características de resistencia ante los agentes corrosivos, las dimensiones de los deflectores se los pueden ver en el plano 3.3059.001 del Anexo 3.

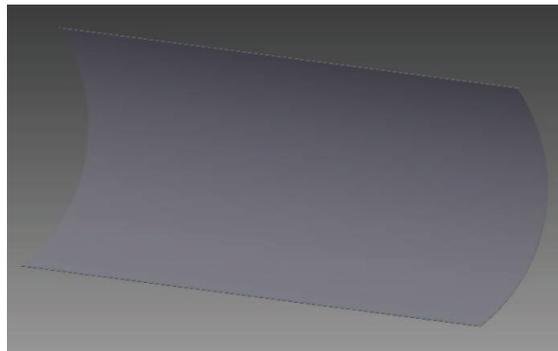


Figura 5. 9 Deflector de aluminio

CAPÍTULO 6

COSTOS DE DISEÑO DEL HORNO

6.1. ANÁLISIS DE COSTOS

Con el horno se busca dar el servicio de secado a las diferentes madereras del país, con la capacidad del horno una carga de 23 m^3 o 720 tablonos se puede secar en aproximadamente 15 días.

Se analizara la inversión a realizar para la adquisición de todos los elementos, materiales equipos, etc. que se involucran durante la construcción e instalación del horno para su normal funcionamiento, los costos serán analizados para un año de funcionamiento del horno.

6.1.1. COSTO DE COMBUSTIBLE (LPG) PARA USO EN EL HORNO

El costo del gas industrial es de 1 USD por Kg para uso industrial esto debido a que este combustible para aplicaciones industriales no es subsidiado, el consumo de combustible por cada carga es de 465.9Kg_{lpg}.

Tabla 6. 1 Costo de combustible

Etapa	Flujo másico (Kg/s)	Tiempo (s)	Masa de combustible (Kg)
Calentamiento	2.07E-03	21240	43.95
80 a 30 % de CH	2.92E-04	900000	262.61
30 a 12 % de CH	3.21E-04	496800	159.34
		Total	465.90

$$C_{LPG} = Mt_{LPG} * Cu_{LPG} \quad \text{Ec. (6. 1)}$$

Dónde:

C_{LPG} : Costo anual del gas usado en el proyecto ($USD/año$)

Mt_{LPG} : Masa total del gas usado durante el secado (Kg_{LPG}/mes)

Cu_{LPG} : Costo unitario del kilogramo de LPG (USD/Kg)

$$C_{LPG} = \frac{465.9 Kg_{LPG}}{mes} * \frac{1 USD}{Kg_{LPG}} * 12 \frac{mes}{año}$$

$$C_{LPG} = 5590.8 \frac{USD}{año}$$

Otro combustible que se usará es la gasolina para el funcionamiento del montacargas, por experiencia se puede tomar que un montacargas consume cerca de 20 USD mensuales de gasolina llegando a usar 240 USD anuales.

6.1.2. ENERGÍA ELÉCTRICA CONSUMIDA

Analizando la potencia que utilizará cada equipo se puede encontrar la energía eléctrica usada en el proyecto, como ejemplo se tiene los ventiladores $1.7 Kw$ para cada hora de trabajo, como se tiene un funcionamiento de 8 horas diarias da como resultado $1920 hr/año$. Por tanto el costo anual de energía (CAE) será:

$$CA_E = P * t * Cu_e \quad \text{Ec. (6. 2)}$$

Dónde:

CA_E : Costo anual debido al consumo de energía eléctrica ($USD/año$)

P : Potencia usada por el equipo eléctrico (KW)

t : Tiempo de trabajo del equipo eléctrico (hr)

Cu_e : Costo unitario de energía eléctrica ($USD/kw - h$)

$$CA_E = 1.7 \text{ KW} * 1920 \frac{\text{hr}}{\text{año}} * 0.051 \frac{\text{USD}}{\text{kw} - \text{h}}$$

$$CA_E = 499.4 \text{ USD/año}$$

6.1.3. AGUA (USO INDUSTRIAL, USO HUMANO)

La cantidad estimada de agua se calcula sabiendo la cantidad de vapor de agua que se adicionara al aire y el tiempo que dura cada etapa de secado, lo que da 20000 litros/mes lo que da como resultado 240 m³/año y el costo por m³ es de 0,6 por lo que el costo de consumo de agua (CCA) es:

$$CCA = 240 \frac{\text{m}^3}{\text{año}} \times 0,6 \frac{\text{USD}}{\text{m}^3}$$

$$CCA = 144 \text{ USD/año}$$

Dónde:

CCA : Costo anual por el concepto de agua (USD/año)

Tabla 6. 2Costos de servicios básicos

Tipo	Consumo		Costo	Costo anual (USD)
Agua	2000(m ³)		0.6	144
Energía eléctrica	KW-hr	Unidades	Costo	Costo anual (USD)
Ventiladores	1.7	3	0.051	1498.18
Sistemas de control	0.5	1	0.051	146.88
Total servicios básicos				1789

6.1.4. ESTRUCTURA DEL HORNO

Para encontrar la cantidad de materiales a utilizar para la infraestructura es necesario basarnos en las dimensiones del horno, los materiales a utilizar son cemento, arena, piedra y ladrillos.

Ejemplo de cálculo para el mortero

Longitud de la pared 6.789 metros

Ancho de la pared 4.6 metros

Espesor de la capa de mortero 0.01 metros

$$V = n * l * a * e \quad \text{Ec. (6. 3)}$$

Dónde:

V : Volumen del recubrimiento (m^3)

n : Número de recubrimientos (-)

l : Longitud de la pared (m)

a : Ancho de la pared (m)

e : Espesor de la pared (m)

$$V = 4 * 6.789 * 4.6 * 0.01 m^3$$

$$V = 1.25m^3$$

Para la mezcla del mortero se utiliza cemento y ripio en proporción de 1/3 de arena y 2/3 de cemento.

Tabla 6. 3 Volumen y masa de mortero

Elemento	m^3	Kg	(1/3 arena) m^3	(2/3 cemento) Kg
Mortero	1.25	2325	0.41	1550

Las empresas que realizan construcción civil generalmente multiplican las cantidades obtenidas para construcción por 1.06 para cubrir los desperdicios que se tienen.

Tabla 6. 4 Volumen y masa de mortero ideal a utilizar

Elemento	m ³	Kg	(1/3 arena) m ³	(2/3 cemento) Kg
Mortero	1.33	2464.5	0.44	1643

Con esto se puede obtener los costos de los materiales de construcción ya que estos se venden por metro cubico y kilogramos.

Para la cantidad de ladrillo se hace el siguiente análisis

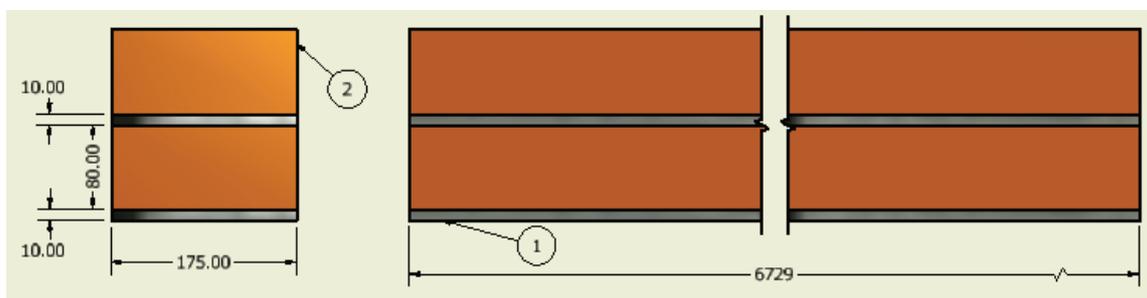


Figura 6. 1 Arreglo de ladrillo

La pared tiene una altura de 4.6 metros por lo tanto la pared está compuesta por:

$$\text{Nro de arreglos} = \frac{4.600 \text{ m}}{(0.01 + 0.08 + 0.01)\text{m}} = 46 \text{ arreglos a lo alto}$$

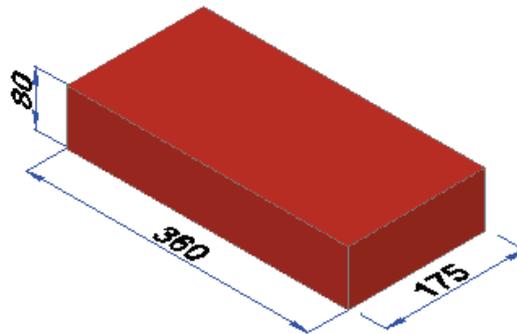


Figura 6. 2 Dimensiones del ladrillo

$$\text{Nro de arreglos} = \frac{6.729 \text{ m}}{(0.01 + 0.36) \text{ m}} = 18 \text{ arreglos a lo largo}$$

La cantidad se obtiene multiplicando el número de arreglos por el número de paredes de estas dimensiones

$$\text{Nro ladrillos necesario} = 18 * 46 * 2 = 1656 \text{ ladrillos}$$

$$\text{Nro ladrillos real} = 1656 * 1.06 \text{ ladrillos}$$

$$\text{Nro ladrillos real} = 1755 \text{ ladrillos}$$

Resultados de materiales para construcción

Tabla 6. 5 Volumen de mortero neto debido a la obra civil

Elemento	V (m^3)	M (Kg)	1/3 Arena (m^3)	2/3 Cemento (Kg)
Volumen de mortero	2.85	5302.79	1	3535

Tabla 6. 6 Cantidad total de ladrillos a usar

Elemento	Pared Lateral	Pared Posterior	Total
Ladrillo (U)	1656	506	2292

Tabla 6. 7Volumen de hormigón a usar en el techo

Elemento	V (m^3)	M (Kg)	1/3 Cemento (Kg)	1/3 Piedra (m^3)	1/3 Arena (m^3)
Techo	4.08	9393.68	3131	1.36	1.36

Tabla 6. 8Costos concepto obras de Ingeniería Civil¹²²

Valor de edificios, estructuras y obras de ingeniería civil				
Ítem	Unidad	Cantidad	Costo (USD)	
			Unitario	Total
Preparación y acondicionamiento del terreno				
Limpieza manual del terreno	m2	100	1.5	150
Mano de obra para construcción	días	10	200	2000
Replanteo y nivelación	m2	100	1.2	120
Excavación de cimiento	m3	100	8.5	850
Cerramiento	m2	150	3.5	525
Mampostería	Unidad	2292	0.12	275.04
Arena	m3	1.36	10	13.6
Ripio	m3	1.36	2.8	3.808
Cemento	kg	3131	0.1464	458.4
Varilla	qq	2	54.86	109.72
Hormigón	m3	3.96	62.5	247.5
Malla electro soldada 6.25x2.4	Unidad	2	23.12	46.24
Sistema agua potable	Unidad	1	500	500
Redes eléctricas	Unidad	1	200	200
Redes telefónicas	Unidad	1	250	250
Valor total de preparación y acondicionamiento del terreno				5749.3

¹²²<http://www.camaraconstruccionquito.ec/>

6.1.5. EQUIPOS PRINCIPALES DEL HORNO

Se realizará el análisis de todos los equipos y partes que componen el horno lo que se detalla en los siguientes cuadros.

Tabla 6. 9Costos del equipo básico

Equipo básico				
Etapa del proceso	N° de unidades	Detalle	Costo Unitario	Costo total
Movimiento de aire	3	Ventiladores	514.8	1544.4
Humidificación	1	Humidificador	200	200
Sistema de calefacción	1	Quemador, con sistema de control automático	869	869
Transporte de gas	1	Conjunto para transporte de gas	500	500
Valor total equipo básico				2369

Tabla 6. 10Costos del equipo auxiliar

Equipo auxiliar				
Tipo de equipo	N° de unidades	Detalle	Costo unitario	Costo total
Equipo de transporte	1	Montacargas capacidad 2000 Kg	4000	4000
Equipo eléctrico	1	Generador de 3500 Watts	550	550
Valor total equipo auxiliar				4085

6.1.6. COSTOS DE INSTALACIÓN DEL HORNO ¹²³

El horno tiene componentes que están compuestas de materiales diferentes a la que se utilizó en obra civil, estas son las puertas, cielo falso, ductos de transporte de gases y cámara de combustión a continuación se detallaran los costos de

¹²³<http://www.camaraconstruccionquito.ec/>

instalación de estos componentes. Para determinar las cantidades de cada material a utilizar para ensamblar cada componente se analizará las dimensiones que normalmente tienen las presentaciones que se encuentran en el mercado.

Tabla 6. 11 Costos de instalación las puertas del horno

Puertas	Unidad	Descripción	Cantidad (Unidad)	Costo Unitario (USD/unidad)	Costo total (USD)
Láminas de tol galvanizado	U	Plancha 1.22x2.44 metros x 2 mm	16	45.53	728.48
Tubo cuadrado	U	Tubo cuadrado 1" x 6 metros	8	18.12	144.96
Lana de vidrio	m3	Paquete de 2.5x0.65 metrosx1 " de espesor	12	4.76	57.12
Tornillos	U	Tornillos M5	68	0.12	8.16
Pernos	U	pernos M5	68	0.1	6.8
Total puertas					945.52

Tabla 6. 12 Costos de instalación del cielo falso

Cielo falso	Unidad	Descripción	Cantidad (Unidad)	Costo Unitario (USD/unidad)	Costo total (USD)
Láminas de tol galvanizado	U	Plancha 1.22x2.44 metros x 2 mm	28	45.53	1274.84
Tubo cuadrado	U	Tubo cuadrado 1" x 6 metros	4	18.12	72.48
Tornillos	U	Tornillos M5	72	0.12	8.64
Pernos	U	pernos M5	72	0.1	7.2
Lana de vidrio	m3	Paquete de 2.5x0.65 metrosx1 " de espesor	18	4.76	85.68
Total cielo falso					1448.84

Tabla 6. 13 Costos de instalación del intercambiador de calor

Intercambiador de calor	Unidad	Descripción	Cantidad (Unidad)	Costo Unitario (USD/unidad)	Costo total (USD)
Tubos	U	Tubo De Acero1" de diámetro	90	38	3420
Distribuidor de gases	U	Ducto acero	2	50	100
Ducto Chimenea	U	Ducto acero	1	60	60
Total intercambiador					3580

Tabla 6. 14 Costos de instalación de la cámara de combustión

Cámara de combustión	Unidad	Descripción	Cantidad (Unidad)	Costo Unitario (USD/unidad)	Costo total (USD)
Láminas de acero inoxidable	U	Plancha de 1.22x2.44 metros x 2 mm de espesor	3	292.152	876.456
Láminas de tol galvanizado	U	Plancha 1.22x2.44 metros x 2 mm	3	45.53	136.59
Lana de vidrio	U	Paquete de 2.5x0.65 metrosx1 " de espesor	2	4.76	9.52
Electrodos	U	Electrodos R91 acero inox. (lb)	3	5	15
Ducto transporte gases	U	Ducto acero inox.	1	200	200
Ducto transporte LPG	U	Tubo acero 1/2 "de diámetro (m)	20	15	300
Total cámara de combustión					1537.566
Adicionales	Unidad	Descripción	Cantidad	Costo U	Costo total
Deflectores	U	Plancha curva	2	20	40
Termómetros	U	Termómetros de vidrio	4	20	80
Total adicionales					120

Ítem	Total
Costos (USD/año)	7379.86
Inversión total (USD)	22074.6424

CAPÍTULO 7

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se analizará la rentabilidad financiera del proyecto, mediante el estudio de los indicadores financieros tales como TIR, VAN, etc., permitiendo su ejecución y operación en condiciones de éxito.

Para obtener un análisis financiero se tiene que analizar a más de los costos de construcción del horno del capítulo 6, los costos directos e indirectos que intervienen en la operación del horno los cuales serán detallados a continuación.

7.1. COSTOS DIRECTOS

Los costos directos son los que varían proporcionalmente con la producción de en nuestro caso con la cantidad de madera secada.

7.1.1. MANO DE OBRA DIRECTA

Se definirá el recurso humano que participara en el proyecto, además del costo que se tendrá por este concepto debido al salario, décimo tercero y cuarto sueldo.

Décimo tercer sueldo: equivale a la suma de todo lo ganado durante todo el año dividido para doce.

Décimo cuarto sueldo: sin importar la remuneración mensual que perciba cada trabajador, este sueldo será como límite un salario mínimo vital unificado (\$318).

Fondos de reserva: 11.35% del valor anual percibido por el trabajador.

Tabla 7. 1 Costos concepto salarios ¹²⁴

Nombre del cargo	Nro. de personas	Asignación mensual	Valor Anual	Décimo tercer sueldo	Décimo cuarto sueldo	Fondos de reserva	Costo total anual
Operario horno	1	350	4200	350	318	476.7	5346.7
Supervisor	1	650	7800	650	318	885.3	9655.3
Costo total	-	1000	12000	1000	636	1362	15002

¹²⁴<http://www.relacioneslaborales.gob.ec>

Se ha seleccionado esos costos para el operario porque se ha considerado el salario mínimo sectorial de un operador de montacargas hasta 94 hp, y la del supervisor se debe a que se encargará de todas las operaciones que se tendrán durante el secado de la madera.

7.1.2. CARGAS SOCIALES

Es el aporte al IESS que es el 9.35 % del costo total anual percibido por todo el personal.

Tabla 7. 2 Cargas sociales del proyecto

Carga social	
Nombre del cargo	Aporte al IESS
Operario alimentación de la madera	499.91645
Supervisor	902.77055
Total mano de obra directa	1402.687

7.2. COSTOS INDIRECTOS

Útiles de oficina

Los útiles que se requieren son por ejemplo: papel, lápices, correctores, esferos, etc. Entonces se asume un aproximado de 50 *USD/mes* , lo cual da **600 *USD/año***.

Útiles de aseo y seguridad

Los útiles de aseo y seguridad son elementos que usan los operarios del horno.

Tabla 7. 3 Costos de útiles de aseo y seguridad

Artículo	Cantidad anual	Costo	
		Unitario	Anual
Botas	5	10	50
Mandil	5	10	50
Jabón	25	2	50
Guantes	10	1.5	15
Total			165

Comunicación

Las comunicaciones son elementos que usan los operarios del horno.

Tabla 7. 4 Costos anuales debido a servicio de comunicación

Producto	Cantidad	Costo mensual	Costo anual (USD/año)
Conexión a internet	1	25	300
Uso de telefonía	1	20	240
Total			540

7.3. DETERMINACIÓN DEL PUNTO DE EQUILIBRIO ¹²⁵

El punto de equilibrio determina el volumen de producción en el proyecto para no tener ganancias y tampoco pérdidas, se debe tener en cuenta que en este análisis no interviene la inversión.

Para obtener el punto de equilibrio se determinara los costos fijos y variables implicados en el proyecto.

7.3.1. COSTOS FIJOS

Es la suma total de los costos que no son directamente proporcionales a la producción tal es caso de los costos por mano de obra, de servicios básicos, etc.

Para el año 1 se tiene:

$$\text{Costos fijos} = 18909 \text{ USD/año}$$

¹²⁵ R. RUIZ. (2012), Folleto de Formulación y Evaluación de Proyectos. Pag 102, 103

7.3.2. COSTOS VARIABLES

Es la suma total de los costos que son directamente proporcionales a la producción que para nuestro caso es principalmente el costo del combustible (GLP).

$$\text{Costos variables} = 22747,41 \text{ USD/año}$$

Para el cálculo del punto de equilibrio se asume la máxima producción del horno el cual es:

$$\text{Producción} = 17280 \text{ tablones/año}$$

Con esto se puede tener los costos variables unitarios

$$\text{Costos variables unitarios} = \frac{22747,41 \text{ USD/año}}{17280 \text{ tablones/año}} = 1.32 \frac{\text{USD}}{\text{tablón}}$$

Ecuación de costos:

$$Ct = Cf + Cva \times P \quad \text{Ec. (7. 1)}$$

Dónde:

Ct : Costos totales (USD/año)

Cf : Costos fijos (USD/año)

Cva : Costos variables unitarios (USD/ m³)

P : Producción (Tablones)

$$Ct = 18908 + 1.32 \times P$$

Tabla 7. 5 Valores de ingreso ecuación de costos

Producción	Costos
0	18908
5000	25508
10000	32108
15000	38708
20000	45308
25000	51908

7.4. INGRESOS

Para obtener la ecuación de ingresos se debe tomar en cuenta el precio que se cobrará por tablón

$$\text{Precio} = 3 \text{ USD/tablón}$$

Ecuación de ingresos:

$$I = 3 \frac{\text{USD}}{\text{tablón}} * P \quad \text{Ec. (7. 2)}$$

Dónde:

I : Ingresos (USD)

P : Producción (Tablones)

Para obtener la gráfica de la **Ecuación 7.2** se procede a dar valores en P (producción), como se muestra a continuación.

Tabla 7. 6 Valores de la ecuación de ingresos

Producción	Ingresos
0	0
5000	1500
10000	30000
15000	45000
20000	60000
25000	75500

EL punto de equilibrio se tendrá cuando los ingresos sean iguales a los costos del proyecto.

$$I = Ct \quad \text{Ec. (7. 3)}$$

Dónde:

I : Ingresos (USD/año)

Ct : Costos totales (USD/año)

$$P = \frac{18908}{3 - 1.32}$$

$$Q_e = 11255 \text{ tablones/año}$$

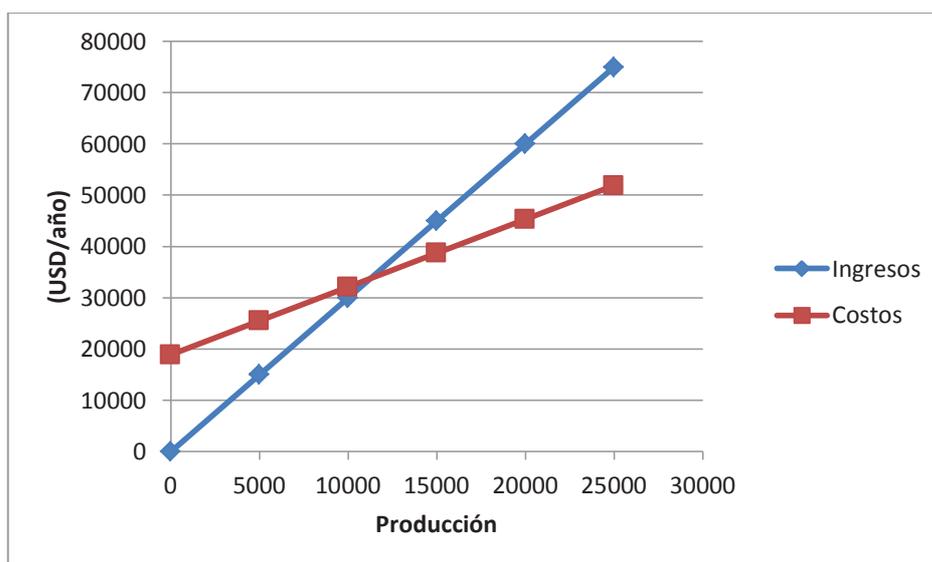


Figura 7. 1 Punto de equilibrio del proyecto

Dividiendo el punto de equilibrio para 720 que es el número de tablones por carga en el horno y sabiendo que cada carga durará aproximadamente 15 días en secar, se obtiene el número de cargas que debe tener al año para no tener ni pérdidas ni ganancias.

$$\text{Numero de Cargas} = \frac{11255}{720} = 15,63$$

Por lo que se tiene un mínimo de 16 cargas al año, sabiendo que idealmente se puede tener 24 cargas al año, se realizará un análisis financiero para 20 cargas considerando el tiempo que tardara la carga y descarga de los tablones de madera en el horno.

7.5. EVALUACIÓN DEL PROYECTO ¹²⁶

El objetivo de dar el servicio de secado es obtener una determinada utilidad, con la evaluación del proyecto se busca determinar el grado de utilidad que se obtiene al utilizar todo el capital para la ejecución del proyecto.

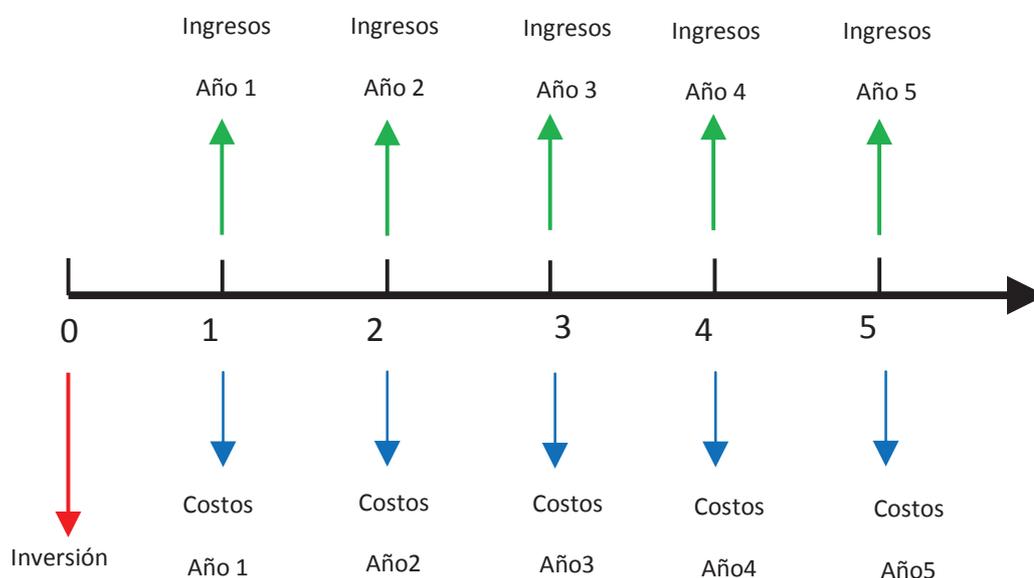


Figura 7. 2Diagrama de flujos de capital

7.5.1. DEPRECIACIÓN

La depreciación es la pérdida de valor comercial de maquinaria, edificios, etc. según cómo pasan los años, todo bien se deprecia excepto los terrenos. A continuación se presenta un ejemplo de cálculo de depreciación de la obra civil que se deprecia 5 % al año.

¹²⁶ R. RUIZ. (2012), Folleto de Formulación y Evaluación de Proyectos. Pág. 105

$$Vr = Ci - Ci * 5\% * n \quad \text{Ec. (7. 4)}$$

Dónde:

Vr : Valor residual (*USD*)

Ci : Costo inicial (*USD*)

n : Número de años (*año*)

$$Vr = 5749.28 \text{ USD} - 5749.28 \text{ USD} * \frac{5\%}{\text{año}} * 5 \text{ años}$$

$$Vr = 4311.96 \text{ USD}$$

7.5.2. ALÍCUOTA ANUAL

Es el costo que se tiene por concepto de depreciación, esto se lo debe hacer anualmente y permite renovar la maquinaria, equipos, etc.

$$C_A = \frac{Ci - Vr}{n} \quad \text{Ec. (7. 5)}$$

Dónde:

C_A : Alícuota anual (*USD/año*)

$$C_A = \frac{(5749.28 - 4311.96) \text{ USD}}{5 \text{ años}}$$

$$C_A = \frac{287.46 \text{ USD}}{\text{año}}$$

Tabla 7. 7 Desglose de la depreciación del proyecto

Rubros	Valor inicial (USD)	Depreciación	Vida útil (Años)	Valor residual (USD)	Alícuota anual
Obra de ingeniería civil	5749.28	5%	5	4311.96	287.46
Maquinaria:					
Maquinaria y equipos	7748.4	10%	5	3874.2	774.84
Equipo de servicios	1157	20%	5	0	231.2
			Total	8187.16	1293.5

7.5.3. FLUJO DE CAJA DEL PROYECTO

Para determinar el flujo de caja se calcularán los costos totales, la inversión total y la utilidad neta obtenida.

$$C_t = C_{MO} + C_{CS} + C_{CB} + C_{AUO} + C_{AUS} + C_{ASB} + C_{ASC} \quad \text{Ec. (7. 6)}$$

Dónde:

C_t : Costos totales (*USD/año*)

C_{MO} : Costos de la mano de obra (*USD/año*)

C_{CS} : Costos de carga social (*USD/año*)

C_{CB} : Costos de combustible (*USD/año*)

C_{AUO} : Costos anuales de útiles de oficina (*USD/año*)

C_{AUS} : Costos anuales de útiles de seguridad (*USD/año*)

C_{ASB} : Costos anuales de servicios básicos (*USD/año*)

C_{ASC} : Costos anuales de servicios de comunicación (*USD/año*)

$$C_t = (15002 + 1402.68 + 22603.2 + 600 + 165 + 1213.92 + 540) \frac{USD}{año}$$

$$C_t = 41656.41 \frac{USD}{año}$$

Para realizar la proyección de cómo se incrementarían los costos a futuro se utiliza el índice de inflación proyectado.

Tabla 7. 8 Datos de índice de inflación¹²⁷

AÑOS	IPC
2006	0.24
2007	0.27
2008	0.71
2009	0.35
2010	0.27
2011	0.44
2012	0.48
2013	0.50
2014	0.52
2015	0.53
2016	0.55
2017	0.57
2018	0.59

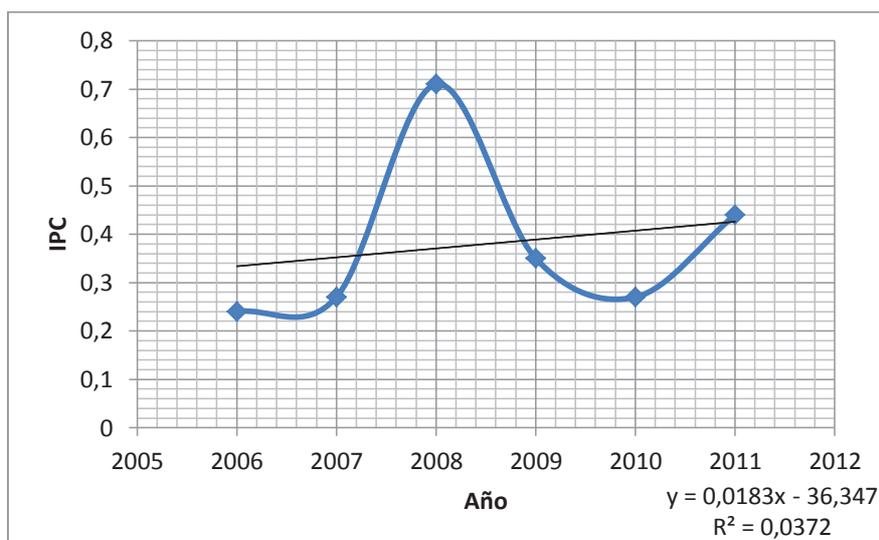


Figura 7. 3 Curva del índice de inflación anual

Los cuadros marcados indican los valores obtenidos al obtener la función de la curva **Figura 7.3**, estos valores nos permiten proyectar los costos hasta el año 2018. Con los índices de inflación se procede a proyectar los costos anuales a partir del costo inicial total.

¹²⁷<http://www.inec.gov.ec>

$$C_{TA2} = C_{TA1} + C_{TA1} * IA \quad \text{Ec. (7. 7)}$$

Dónde:

C_{TA2} : Costos totales al año 2 de producción (*USD/año*)

C_{TA1} : Costos totales al año 1 de producción (*USD/año*)

IA : Inflación anual (%)

$$C_{TA2} = 41656.41 + 41656.41 * 0.53\%$$

$$C_{TA2} = 63921.75 \text{ USD/año}$$

Tabla 7. 9 Proyección de los costos del proyecto

Año	1	2	3	4	5
Costos totales (USD año)	41656.41	63921.76	99257.70	155943.78	247857.04

7.5.4. PRESUPUESTO DE INGRESOS

Se realiza el mismo procedimiento de los costos para el análisis del ingreso de capital que se tendrá en el proyecto, el único ingreso que se tendrá será por el servicio de secado, para concordar con los otros lugares que ofrecen este servicio se cobrara 3 dólares por cada tablón secado. El número de tablonos que se secará anualmente es de 14400 que corresponde a 20 cargas anuales, las cuales son resultado del análisis del punto de equilibrio, por lo tanto el ingreso será el siguiente:

$$I = Nro_{\text{tablonos}} * C_{SE} \quad \text{Ec. (7. 8)}$$

Dónde:

I : Ingresos del proyecto (*USD/año*)

Nro_{tablonas} : Número de tablonas a secar anualmente (*Tablonas*)

C_{SE} : Costo unitario a cobrar por secado de cada tablón (*USD/tablón*)

$$I = 14400 \frac{\text{tablonas}}{\text{año}} * 3 \frac{\text{USD}}{\text{tablón}}$$

$$I = 43200 \frac{\text{USD}}{\text{año}}$$

Para proyectar los ingresos a futuro se utiliza el índice del crecimiento del precio de los productos elaborados en base de madera.

Tabla 7. 10 Índice de incremento de precios de productos de madera¹²⁸

Año	IP
2006	0.31
2007	0.16
2008	0.3
2009	0.40
2010	0.38
2011	0.43
2012	0.46
2013	0.50
2014	0.54
2015	0.58
2016	0.62
2017	0.65
2018	0.69

¹²⁸<http://www.inec.gov.ec>

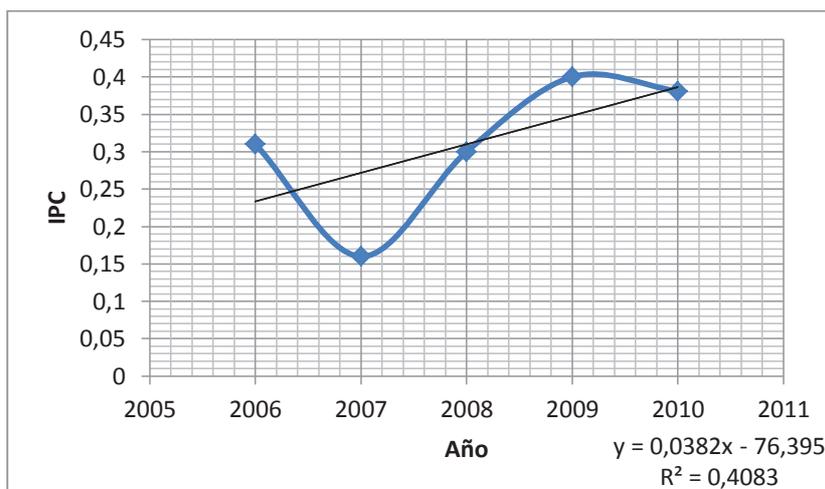


Figura 7. 4Curva de variación del índice de precios de productos elaborados de madera

Con los índices de variación de los precios de producto elaborados de madera se procede a proyectar los ingresos anuales a partir del ingreso inicial.

$$I_{TA2} = I_{TA1} + I_{TA1} * IP \quad \text{Ec. (7. 9)}$$

Dónde:

I_{TA2} : Ingresos totales al año 2 de producción (USD/año)

I_{TA1} : Ingresos totales al año 1 de producción (USD/año)

IP : Índice de precios (%)

$$I_{TA2} = 43200 + 43200 * 0.58\%$$

$$I_{TA2} = 68169.6$$

Tabla 7. 11 Proyección de los ingresos del proyecto

Año	1	2	3	4	5
Ingreso	43200	68169.6	110175.70	182274.69	308518.14

La utilidad neta del proyecto se la determina de la diferencia entre los ingresos totales y los costos totales.

$$U_N = I_T - C_T \quad \text{Ec. (7. 10)}$$

Dónde:

U_N : Utilidad neta (USD/año)

I_T : Ingresos totales ($USD/año$)

C_T : Costos totales ($USD/año$)

$$U_N = (43200 - 41656.41) \frac{USD}{año}$$

$$U_N = 1543.59 \frac{USD}{año}$$

El flujo de operación del proyecto se lo determina al sumar la utilidad neta y la alícuota anual.

$$F_O = U_N + C_A \quad \text{Ec. (7. 11)}$$

Dónde:

F_O : Flujo de operación ($USD/año$)

C_A : Alícuota anual ($USD/año$)

$$F_O = (1673.19 + 1168.16) \frac{USD}{año}$$

Tabla 7. 12 Flujo de operación del proyecto

Rubros/año	0	1	2	3	4	5
Inversiones	22074					
Utilidad neta		1543.59	4247.84	10918.00	26330.91	60661.10
Alícuota anual		1293.5	1293.5	1293.5	1293.5	1293.5
Flujo de operación	22074	2837.1	5541.34	12211.5	27624.4	61954.8

7.5.5. VALOR ACTUAL NETO

Es el valor presente de los flujos de costos e ingresos que se tienen durante los años que tiene el proyecto, este es el valor obtenido al actualizar el flujo neto a una de interés constante.

$$VA = F_O(1 + i)^{-n} \quad \text{Ec. (7. 12)}$$

Dónde:

VA : Valor actual (USD/año)

i : Tasa de interés presente en el mercado (8.17%)

n : Número de año a actualizar el valor anual (Unidad)

$$VA = 2854 (1 + 8.17\%)^{-1}$$

Tabla 7. 13 Valor actual neto del flujo neto

Años	Inversiones (USD)	Utilidad neta (USD/año)	Flujo neto (USD/año)	Valor actual (USD/año)
0	22074		22074	22074
1		1543.59	2837.1	2623
2		4247.84	5541.34	4736
3		10918.00	12211.5	7604
4		26330.91	27624.4	20177
5		60661.10	61954.8	41835
			VAN	54901

El Valor Actual Neto (VAN) es positivo de 54901 lo cual indica que el proyecto es viable.

7.5.6. TASA INTERNA DE RETORNO

Es aquella tasa en la cual los ingresos son iguales al valor actualizado de los egresos de capital es decir VAN=0

Para encontrar el TIR calculamos dos valores actuales netos primero una tasa para la cual el VAN es positivo y para una tasa para la cual el VAN es negativo y luego se utiliza la siguiente formula.

$$TIR = \left[i_1 + (i_2 - i_1) \left(\frac{VAN_1}{VAN_1 - (VAN_2)} \right) \right] \times 100 \quad \text{Ec. (7. 13)}$$

Dónde:

TIR : Tasa interna de retorno (%)

i_1 : Tasa de interés para la cual el VAN es positivo (%)

i_2 : Tasa de interés para la cual el VAN es negativo (%)

VAN_1 : Valor actual neto para la tasa de interés 1 (USD/año)

VAN_2 : Valor actual neto para la tasa de interés 2 (USD/año)

Tabla 7. 14 Tasa interna de retorno

Años	Flujo neto (USD/año)	V.A.N. 12% (USD/año)	V.A.N. 90% (USD/año)
Años	Flujo neto	V.A.N. 12%	V.A.N. 90%
0	22074	22074	22074
1	2837.1	2533	1493
2	5541.34	4418	1535
3	12211.5	6851	1403
4	27624.4	17556	2120
5	61954.8	35155	2502
	VAN	44438	-13021

$$TIR = \left[0.12 + (0.9 - 0.12\%) \left(\frac{44438}{44438 - (-13021)} \right) \right] \times 100$$

$$TIR = 72.3 \%$$

La Tasa Interna de Retorno (TIR) tiene un valor del 72,3%, mientras que la tasa de interés activa es de 8,17% (datos según el Banco Central) por lo que el $TIR \gg TIA$ razón por la cual podemos decir que la ganancia producida por el capital es muy elevada para cada período, por tanto este índice muestra al proyecto como viable.

7.5.7. PERÍODO DE RETORNO DE CAPITAL

Es el coeficiente que permite determinar en qué tiempo se recuperara todo el capital invertido en el proyecto

$$p = \frac{100}{TIR} \quad \text{Ec. (7. 14)}$$

Dónde:

p : Periodo de retorno de capital

$$p = \frac{100}{72,3}$$

$$p = 1.4$$

El capital se lo recupera en 1 año, 4 meses y 7 días, esto se debe a que el TIR es elevado debido a la alta rentabilidad del proyecto, razón por la cual éste es muy atractivo para los inversionistas.

7.5.8. RELACIÓN BENEFICIO COSTO

$$B/C = VAN_{(ingresos)}/VAN_{(egresos)} \quad \text{Ec. (7. 15)}$$

Dónde:

B/C : Relación Beneficio Costo (–)

$VAN_{(ingresos)}$: Valor actual neto de los ingresos asociados con el proyecto (USD/año)

$VAN_{(egresos)}$: Valor actual neto de los egresos asociados con el proyecto (USD/año)

$$\frac{B}{C} = VAN_{(ingresos)}/VAN_{(egresos)}$$

Tabla 7. 15 Relación beneficio costo

Años	Ingresos netos (USD/Año)	VAN (USD/Año)	Costos (USD/Año)	VAN (USD/Año)
1	43200	39937	41656	38510
2	68170	58261	63922	54630
3	110176	87049	99258	78423
4	182275	133137	155944	113904
5	308518	208327	247857	167366
	Total	526712	Total	452834

$$\frac{B}{C} = \frac{526712}{452834}$$

$$\frac{B}{C} = 1.16$$

La Relación Beneficio-Costo del proyecto es de 1,16 es decir es mayor que uno lo que significa que el VAN del proyecto es positivo y por lo tanto el proyecto es rentable.

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 CONCLUSIONES

- Con el análisis de los diferentes tipos de hornos de secado de madera se pudo concluir que el horno por convección es la mejor alternativa debido a varios aspectos como: costos, facilidad de construcción y por la calidad de secado que se puede obtener.
- Con el estudio de los parámetros de operación del horno como temperatura, humedad relativa y velocidad del aire se pudo obtener un diseño que da como resultado el contenido de humedad final deseado en la madera en un tiempo mucho menor que el secado al aire libre.
- Para determinar la temperatura de funcionamiento del horno y la humedad relativa en cada etapa de secado, se consideró los diferentes programas de secado que dependen directamente del tipo de madera y del espesor del tablón.
- Para el análisis del horno se consideró materiales y equipos que se pueden conseguir con facilidad en el mercado Ecuatoriano.
- Las dimensiones finales del horno se obtuvieron tomando en cuenta la capacidad de producción establecida y las recomendaciones de apilamiento y espaciado de la madera ya que gracias a estas recomendaciones se puede obtener buenas condiciones de flujo de aire para mejorar el proceso de secado.
- La forma y el volumen de la cámara de combustión dependió directamente del tipo y forma de quemador seleccionado, del espacio que debe existir para que se produzca la combustión y el desarrollo de la llama.
- Después de analizar todos los indicadores financieros, bajo las condiciones utilizadas se puede concluir que el proyecto de un horno de secado de

madera es viable ya que tiene una alta rentabilidad y el tiempo de recuperación de la inversión es apenas de 1 año 4 meses.

8. 2 RECOMENDACIONES

- Para la construcción del horno se recomienda sujetarse estrictamente al dimensionamiento y selección de los materiales y equipos realizados en el proyecto.
- Para alguna empresa maderera es recomendable utilizar un horno por convección como es el caso de este diseño ya que se demostró su rentabilidad y el tiempo de recuperación de la inversión.
- Si se construye el horno se debe seguir estrictamente las recomendaciones técnicas de apilamiento y respetar los programas de secado, ya que de estos dependen el tener un buen resultado en el secado en un tiempo establecido por los programas de secado para cada tipo de madera, con el contenido de humedad final deseado.
- Para mejorar el diseño se recomienda instalar un sistema de control automático que controle los parámetros principales como temperatura y humedad relativa dentro del horno, el cual reducirá el tiempo de inspección y reducirá los costos de operación.
- Para especies de madera que se encuentran en el Ecuador se recomienda trabajar con un plan de secado suave para evitar deformaciones en la madera.
- Se recomienda que los equipos seleccionados cumplan con las características necesarias para el correcto funcionamiento del horno y que cumplan con propiedades como resistencia a ambientes corrosivos y resistencia a altas temperaturas.
- Para el posterior uso del horno se recomienda capacitar al personal que vaya a operar el mismo, para obtener un buen resultado en el secado.

BIBLIOGRAFÍA

LIBROS Y TESIS CONSULTADAS

- ARIAS P. (2010). *Diseño de un sistema de secado de madera para la empresa parquet*. Riobamba, Ecuador.
- CENGEL, Y. (2004). *Transferencia de Calor y Masa*. México: MC Graw Hill.
- CHAPALBAY Y., REINOSO P. (2011). *Diseño y simulación del funcionamiento de un secador de flujo forzado para madera permeable con capacidad de 43 m³/MES, utilizando un quemador de biomasa*. Sangolquí, Ecuador.
- CIURLO, F. (2006). *Conceptos básicos del secado de la madera*.
- F. INCROPERA, D. DEWITT, (1999), *Fundamentos de transferencia de calor*, México, Prentice Hall..
- GRUPO ANDINO. (1989). *“Manual del grupo andino para el secado de maderas”*, Lima, Perú, Carvajal.
- MELO R.(1993) *Madera, Programa Nacional de apoyo a la pequeña y mediana industria*.
- NOBOA, L. (2006). *Manual de buenas prácticas de manufactura para el secado de madera aserrada*.
- M. ORTEGA, A. PEÑA; *Cartas Psicrométricas*. Ecuador, E.P.N
- NYLE SYSTEMS. *Introducción del secado al horno*,
- ORBE, L. (1989).*“Contenido de humedad de equilibrio de la madera en varias localidades del Ecuador, Quito, Ecuador*.
- PEDRAS FRANCISCO. *Secado de la madera: Recomendaciones prácticas*, revista Cis Madera.
- P. GONZALEZ. *Rediseño y adecuación de un horno de secado para el proceso de pintado epóxido de multiplicas con una temperatura 170 °C*. Tesis. SangolquíEcuador.
- PORTILLA; G. BACERO, (1991-1992); *Seminario de Secadores*. AEIM.

- R. CALLE, J. APARICIO, (2011) *Diseño de una planta de deshidratación de yerbas aromáticas*, Ecuador, E.P.N.
- R. RUIZ. (2012), *Folleto de Formulación y Evaluación de Proyectos*.
- *THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF MATTER*, (1970); *Thermophysical Properties of matter*, New York.
- VISCARRA SILVERIO, (1998) *Guía práctica para el secado en hornos*.
- Y. CENGEL, M. BOLES, (2002); *Termodinámica*. México-México DF, McGraw-Hill

BIBLIOGRAFIA DIGITAL

- <http://secadodemadera.blogspot.com/>.
- <http://spanish.alibaba.com/product-gs/rf-radio-frequency-wood-drying-equipment-697183902.html>
- <http://www.experimentosfaciles.com>
- http://ocw.upm.es/produccion-animal/produccion-avicola/contenidos/TEMA_3/3-2-condiciones-ambientales-ta-y-hr/view
- http://www.ficlaho.com/ficfog_instalacion.php
- <http://ojs.uo.edu.cu/index.php/tq/article/viewFile/2259/1800>
- <http://www.mausa.es/productos/fotos/tablon20.jpg>
- <http://publiespe.espe.edu.ec/academicas/hormigon/hormigon07-b.htm>
- <http://www.normaconstruccion.ec/index.php/using-joomla/extensions/components/content-component/article-categories/75-actualizacion-de-los-capitulos-de-la-norma-ecuatoriana-de-construccion-nec>
- <http://www.jossoft.com.ar/ARCHIVOS/Pesos%20Especificos.pdf>
- http://www.tutiempo.net/clima/Quito_Mariscal_Sucre/2011/840710.htm
- http://materias.fi.uba.ar/7202/MaterialAlumnos/11_Apunte%20Combustion.pdf
- http://www.areadecalculo.com/monograficos/vidrio/PDFs/Cap_4Combustion.pdf

- <https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2010/2/MI3010/1/material.../310387>
- <http://www.stilar.net/Archivos%20Web/Gas%20natural.pdf>
- https://www5.uva.es/guia_docente/uploads/2011/447/42501/1/Documento15.pdf
- <http://www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r92979.PDF>
- <http://www.megafrio.com.mx/n/http://www.waynecombustion.com/images/gallery/Catalog%20Page-46886G%20WCS%20P250.pdf>
- <http://www.waynecombustion.com/images/gallery/Catalog%20Page-46886G%20WCS%20P250.pdf>
- <http://www.jshumidificadores.com.ar/condair-gs-humidificador-de-vapor-a-gas-834-details/>
- <http://spanish.alibaba.com/product-gs/hvac-damper-constant-air-volume-control-damper-738526807.html>
- <http://www.camaraconstruccionquito.ec/>
- <http://www.relacioneslaborales.gob.ec>
- <http://www.inec.gov.ec>

ANEXOS

ANEXO 1
ESPECIFICACIONES DE EQUIPOS SELECCIONADOS



HXB-T

EXTRACTORES AXIALES
400,500 y 630 mm. de diámetro



Gama de extractores axiales, diseñados en aplicación directa para mover volúmenes de aire considerables, destacando su alto rendimiento y bajo consumo de energía.

Fabricados en base a un diseño robusto y con materiales de la más alta calidad, garantizando larga vida de operación.

Características Principales:

Marco embocadura conformado por embutición, acabado con pintura en polvo poliéster homeada de alta resistencia a la corrosión, hélices con alineación y balanceo preciso, motores en algunos modelos disponibles monofásicos y trifásicos

Aplicaciones:

Ventilación comercial: bodegas, tiendas, almacenes, locales comerciales, locales deportivos, etc.

Ventilación Industrial: naves, talleres, fábricas, refrigeración de máquinas, etc.

Accesorios:

- Cubierta Intemperie
- Persianas
- Malla de protección

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

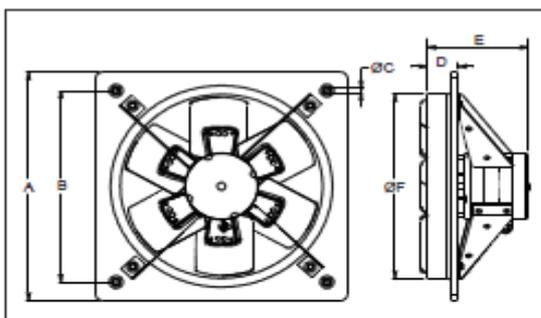
Modelo	Velocidad RPM	Potencia HP	Tensión Volts	Intensidad A	Caudal a descarga libre m ³ /hr / CFM	Presión sonora dB(A)*	Peso aprox. Kg
HXB-400/L	1625	1/8	127	1.6	3,190 / 1,876	60	14
HXB-400/H	1625	1/3	127	2.6	5,450 / 3,206	64	15
HXB-500/L	1625	1/2	127	4.4	7,630 / 4,488	68	19
HXB-500/H	1625	1/2	127	4.4	10,180 / 5,988	71	18
HXT-400/H	1725	1/4	220	2.0	5,450 / 3,206	64	15
HXT-500/L	1650	1/2	220/440	2.0/1.0	7,630 / 4,488	68	19
HXT-500/H	1650	1/2	220/440	2.0/1.0	10,180 / 5,988	71	18
HXT-630/L	1765	1	208-230/460	3.0/1.5	13,500 / 7,941	77	29
HXT-630/H	1760	1 1/2	208-230/460	4.2/2.1	15,930 / 9,371	78	29
HXT/8-630/L	1150	1/2	230/460	2.4/1.2	9,180 / 5,400	70	30
HXT/8-630/H	1130	3/4	208-230/460	3.2/1.6	12,590 / 7,406	73	35

*Velocidad sonora medida de acuerdo a las normas AMCA 50005 y 50105

*L. Hélices con ángulo de menor ataque

*H. Hélices con ángulo de mayor ataque

DIMENSIONES



MODELO	A	B	ØC	D	E		ØF
					ÁNGULO DE INCLINACIÓN		
					L	H	
HXB-400	498	417	9.5	62	188	197	402
HXB-500	628	555	9.5	50	232	227	497
HXT-400	498	417	9.5	62	-	199	402
HXT-500	628	555	9.5	50	210	208	497
HXT-630	809	637	15.9	71	310	310	633

*Dimensiones mm.

Power Conversion

P250AF & P265F GAS BURNERS

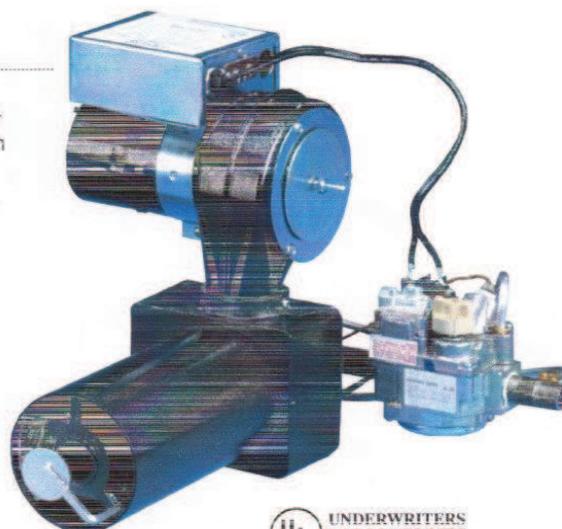
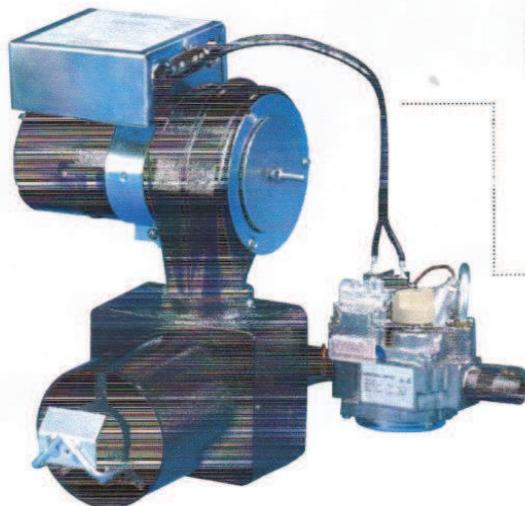


Model features:

All models feature forced draft compact design for high efficiency conversion of oil-fired furnaces, boilers, or water heaters to natural or LP gas. Direct spark ignition is recommended for most applications, however Standing Pilot is available. All Wayne gas burners include die cast aluminum housings for precise alignment of parts and a machined cast iron venturi for superior mixing of gas and air. Universal mounting flange adapts to any appliance. All models factory-wired and test-fired.

P250AF features:

The P250AF features an adjustable flame spreader to allow tailoring of the flame size to the combustion chamber. Fires from 50,000 to 250,000 Btu/hr. Power burner design will increase efficiency up to 30% over atmospheric gas burners. Available in 8" air tube length only.



P265F features:

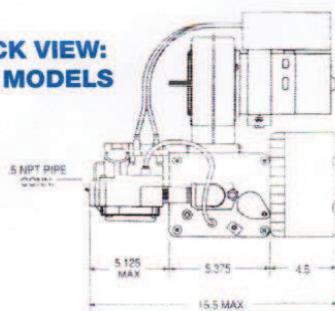
The P265F features a fixed flame spreader, providing a consistent, bushy, round flame. Applications include furnaces, boilers, and water heaters. Fires from 65,000-200,000 Btu/hr. Quiet operation with simple design that is easy to install and service. Available in 5", 8" and 11" air tube lengths.

Specifications

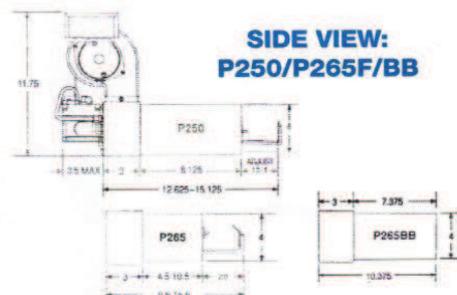
P250AF & P265F GAS BURNERS

P250AF GAS BURNER		P265F GAS BURNER	
Minimum Btu/hr Input	50,000	Minimum Btu/hr Input	65,000
Maximum Btu/hr Input	250,000	Maximum Btu/hr Input	200,000
Voltage	120 Volt, 60Hz	Voltage	120 Volt, 60Hz
Gas Pressure Required	Natural gas - 4.5" W.C. LP gas 11.0" W.C.	Gas Pressure Required	Natural gas - 4.5" W.C. LP gas 11.0" W.C.
Ignition Source	Standing pilot or Direct ignition(recommended)	Ignition Source	Standing pilot or Direct ignition (recommended)
Gas Valve	24 Volt	Gas Valve	24 Volt
Combustion Chamber		Combustion Chamber	
Floor Area	Minimum 0.6 sq. in./1000 Btu/hr Maximum 0.9 sq. in./1000 Btu/hr	Floor Area	Minimum 0.6 sq. in./1000 Btu/hr Maximum 0.9 sq. in./1000 Btu/hr
Gas Connection	1/2" NPT	Gas Connection	1/2" NPT
Air Tube Diameter	4"	Air Tube Diameter	4"

**BACK VIEW:
ALL MODELS**



**SIDE VIEW:
P250/P265F/BB**



MODEL	ORDER WAYNE PART #	AIR TUBE LENGTH	FUEL	IGNITION*	SHIPPING WEIGHT EACH
P250AF	61814	8"	Nat	S.P.	24 lbs.
P250AF	61819	8"	LP	S.P.	26 lbs.
P250AF	63365	8"	LP	D.I.	24 lbs.
P250AF	63366	8"	Nat	D.I.	24 lbs.
P265F	61487	5"	Nat	S.P.	22 lbs.
P265	61175	5"	LP	S.P.	24 lbs.
P265F	61493	8"	Nat	S.P.	24 lbs.
P265F	61497	11"	Nat	S.P.	25 lbs.
P265	61177	11"	LP	S.P.	25 lbs.
P265	63367	5"	LP	D.I.	23 lbs.
P265	63368	5"	Nat	D.I.	23 lbs.
P265F	63369	8"	Nat	D.I.	24 lbs.
P265	63370	11"	LP	D.I.	25 lbs.
P265	63371	11"	Nat	D.I.	25 lbs.
BOILER BURNERS					
P265F BB	62301-001	7 7/8"	Nat	S.P.	24 lbs.
P265F BB	63388	7 7/8"	Nat	D.I.	24 lbs.

*S.P. = Standing Pilot
D.I. = Direct Ignition

Condair GS Humidificador de Vapor a Gas

Tres versiones, seis tamaños de unidades

El Condair GS viene en seis tamaños desde 40 hasta 240kg/h. Si se requiere una capacidad de vapor mayor, se pueden conectar hasta 10 humidificadores, para lograr una enorme salida de 2400kg/h.



Se ofrece una unidad para exteriores con una carcasa apta para todo tipo de climas y protección anticongelante.

Dos modelos disponibles para la instalación en interiores. Una versión de cuarto sellado funciona independientemente de la atmósfera del recinto y obtiene aire para la combustión a través de tuberías desde el exterior. Otra alternativa es un humidificador que toma el aire del recinto, es decir toma el aire del ambiente para la mezcla entre aire y gas.

Control inteligente

El panel de control con monitor gráfico luminoso es fácil de usar e indica el estado de funcionamiento, fallos y requerimientos de mantenimiento. Puede mostrar gráficos del historial de prestaciones y además puede exigir o sugerir soluciones a problemas con su función de troubleshooting.



The system can also be connected to a BMS and accepts Modbus protocol as standard and is available with optional BACnet or LonWorks protocols.



Datos técnicos

Salida de vapor	Consumo de gas (kW)	Peso operativo seco (kg)	Peso operativo lleno (kg)	Dimensiones altura en cm	Dimensiones ancho en cm	Dimensiones profundidad en cm	Voltaje principal	Tipo de gas	Presión de aire admisible en el ducto
40kg/h	30,5	60	211	81 (108 en w soporte)	114	52	AC 230V, 50...60Hz	Gas natural G15, G20, G25, G30, G31, G35, Gas propano G31	800...+1,700 Pa
60kg/h	45	90	270			59			
120kg/h	108,5	225	459			109			
160kg/h	140	301	471			139			
200kg/h	182,5	390	510			149			
240kg/h	219	514	620			162			

www.jshumidificadores.com

JS Humidifiers plc

Member of the Walter Meier Group

Aries Avenue, Ruffington, LITTLEHAMPTON,
West Sussex, BN16 7LN, UK
Tel: +44 (0)1903 850200 • Fax: +44 (0)1903 850245
Email: sales@jshumidifiers.com



INVESTORS
IN PEOPLE



JS Humidificadores



ANEXO 2
COSTOS Y PRECIOS PARA EL PROYECTO

LISTA DE PRECIOS DE MATERIALES DE CONSTRUCCION



CAMARA DE LA CONSTRUCCION DE QUITO

PROV (PROVEEDORES) = Ver lista de Proveedores

PRECIOS INCLUYEN IVA

COD.	MATERIAL	UNI.	PROVEEDOR	PROV.	USD
01	AGLOMERANTES				
0102	CEMENTINA				
010202	Cementina (saco=25 kg)	kg.	Disensa	P33	0.11
0103	CEMENTO				
010301	Cemento Chimborazo	50 kg	Cemento Chimborazo	P20	7.25
010302	Cemento Rocafuerte	50 kg	Disensa	P33	7.36
010304	Cemento Selvalegre	50 kg	Lafarge Cementos S.A.	P103	7.32
010306	Cemento de Aluminato de calcio electroland	Kg	Tespecon	P93	1.67
0104	VIARIOS				
010401	Albalux	25 kg	Disensa	P33	3.54
010402	Litopón	kg.	KywiSupercentro Ferretero	P60	0.96
010403	Yeso	kg.	KywiSupercentro Ferretero	P60	0.60
02	AGREGADOS				
020A	ARENAS				
020201	Arena no lavada (0-5mm) en cantera (1.43 Ton/m3)	m3	Disensa	P33	5.64
020213	Arena lavada de río	m3	Cantera "Carlos Alberto "	P16	10.00
020223	Arena con chispa	m3	Cantera "Carlos Alberto "	P16	10.50
020401	Arena triturada S.S. (SlurrySeal)	m3	Cantera "Carlos Alberto "	P101	2.80
020AF	AGREGADOS FINOS				
020401	Polvo de piedra azul o rosado (en cantera)	m3	Francisco Castellanos	P101	2.80
020402	Polvo de piedra azul (en cantera o fábrica)	m3	Angos e Hijos	P8	2.80
020403	Polvo de piedra rosado (en cantera o fábrica)	m3	Angos e Hijos	P8	2.23
020AG	AGREGADOS GRUESOS				
020203	Piedra chispa #7 Tamiz(5-12mm).En cantera (1.18Ton/m3)	m3	Disensa	P33	11.67
020204	Piedra homogenizada # 57(5-25mm).En cantera (1.23Ton/m3)	m3	Disensa	P33	10.04
020211	Ripio azul triturado (en cantera o fábrica)	m3	Angos e Hijos	P8	1.25
020216	Piedra (para cimientos y/o empedrado)	m3	Cantera "Carlos Alberto "	P16	8.40

LISTA DE PRECIOS DE MATERIALES DE CONSTRUCCION



PROV (PROVEEDORES) = Ver lista de Proveedores

PRECIOS INCLUYEN IVA

0301	CARGADORAS, EXCAVADORAS RETROEXCAVADORAS, ETC.				
030101	Cargadora frontal Cat938G	Día	Angos e Hijos	P8	264.00
030102	Cargadora frontal Cat950G	Día	Angos e Hijos	P8	280.00
030133	Minicargador (incluye operador y combustible)	Día	RenthalMachinery&Servic es	P10 4	179.20
030134	Minicargador (incluye operador y combustible)	Seman a	RenthalMachinery&Servic es	P10 4	967.68
030135	Minicargador (incluye operador y combustible)	Mes	RenthalMachinery&Servic es	P10 4	3,290.11
030136	Miniexcavadora (no incluye operador y combustible)	Día	RenthalMachinery&Servic es	P10 4	173.60
030137	Miniexcavadora (no incluye operador y combustible)	Seman a	RenthalMachinery&Servic es	P10 4	937.44
030138	Miniexcavadora (no incluye operador y combustible)	Mes	RenthalMachinery&Servic es	P10 4	3,374.78
030139	Retroexcavadora (incluye operador y combustible)	Día	RenthalMachinery&Servic es	P10 4	224.00
030140	Retroexcavadora (incluye operador y combustible)	Seman a	RenthalMachinery&Servic es	P10 4	1,276.80
030141	Retroexcavadora (incluye operador y combustible)	Mes	RenthalMachinery&Servic es	P10 4	4,596.48
030142	Volqueta 7 m3 (incluye operador y combustible)	Día	RenthalMachinery&Servic es	P10 4	156.80
0303	CONCRETERAS				
030307	Concretera a diesel o gasolina (1 saco)/día	Día	Macons	P65	24.43
030308	Concretera a diesel o gasolina (1 saco)/semana	Seman a	Macons	P65	106.13
030309	Concretera a diesel o gasolina (1 saco)/qna.	Quince	Macons	P65	195.13
030311	Concretera a dieselautocargable (2 sacos)/semana	Seman a	Macons	P65	472.89
030312	Concretera a dieselautocargable (2 sacos)/qna	Quince	Macons	P65	748.76
030317	Concretera 2 sacos	Día	RenthalMachinery&Servic es	P10 4	22.40
1009	ACERO DE REFUERZO				
100905	Variila corrugada antisísmica A-42S D=12mm	qq	Novacero	P70	54.86
100906	Variila corrugada antisísmica A-42S D=12mm	kg	Novacero	P70	1.21
100909	Variila corrugada antisísmica A-42S D=18-32mm	qq	Novacero	P70	57.86
100910	Variilla sismoresistente soldable D=8mm	qq	Adelca	P31	54.86
100911	Variilla sismoresistente soldable D=10mm	qq	Adelca	P31	54.86
100912	Variilla sismoresistente soldable D=12mm	qq	Adelca	P31	54.86

10091 3	Varilla sismoresistente soldable D=14mm	qq	Adelca	P31	54.86
------------	---	----	--------	-----	-------

LISTA DE PRECIOS DE MATERIALES DE CONSTRUCCION



CAMARA DE LA CONSTRUCCION DE QUITO

PROV (PROVEEDORES) = Ver lista de Proveedores

PRECIOS INCLUYEN IVA

0301	CARGADORAS, EXCAVADORAS RETROEXCAVADORAS, ETC.				
1010	MALLAS ELECTRO SOLDADAS				
101001	Malla M 3.5 15 (6.25x2.40)	mall	Adelca	P31	23.12
101002	Malla M 4 10 (6.25x2.40)	mall	Adelca	P31	43.58
101003	Malla M 4 15 (6.25x2.40)	mall	Adelca	P31	29.43
101004	Malla M 4.5 15 (6.25x2.40)	mall	Adelca	P31	36.34
101005	Malla M 5 10 (6.25x2.40)	mall	Adelca	P31	66.71
1015	TUBOS GALVANIZADOS CERRAMIENTO				
101501	Tubo galvanizado L=6m Poste 3/4"	u	Ideal-Alambrec S.A.	P55	17.17
101502	Tubo galvanizado L=6m Poste 1"	u	Ideal-Alambrec S.A.	P55	26.06
101503	Tubo galvanizado L=6m Poste 1 1/2"	u	Ideal-Alambrec S.A.	P55	35.73
101504	Tubo galvanizado L=6m Poste 2"	u	Ideal-Alambrec S.A.	P55	45.10
101505	Tubo galvanizado L=6m Poste 3/4"	u	Perfilec-Kubiec	P61	16.67
101506	Tubo galvanizado L=6m Poste 1"	u	Perfilec-Kubiec	P61	21.00
101507	Tubo galvanizado L=6m Poste 1 1/2"	u	Perfilec-Kubiec	P61	34.75
101508	Tubo galvanizado L=6m Poste 2"	u	Perfilec-Kubiec	P61	43.84
24	HORMIGÓN PREMEZCLADO				
2403	RESISTENCIA f'c=140 Kg./cm2				
240301	f'c= 140 Kg./cm2	m3	Hormigonera Quito	P51	39.28
240302	f'c= 140 Kg./cm2 chispa	m3	Hormigonera Quito	P51	46.38
240303	f'c= 140 Kg./cm2 (hormigón, transporte, bomba, plastificante)	m3	Hormigonera Equinoccial	P50	62.50



- CALCULO QUE NO APARECE EN PRESENTACIÓN

ANALISIS PARA INDUSTRIA		
22.9 kilogramos de GLP es igual a 1'000.000 btu		22.9
Precio kilogramo de uso industrial de GLP	\$	1.00
Precio de GLP en 1'000.000 btu	\$	22.97
Precio de Venta GNL a industria en fabrica (planta)	\$	5.31
Ahorro o Diferencia	\$	17.66
Porcentaje de ahorro		76.88%

MEGAFRIO S.A

LISTA DE PRECIOS

EXTRACTORES AXIALES DIRECTOS CON MOTOR				MARCA	PVP	P	S&P
06008002	11455034	EXTRACTOR HELEICOIDAL PARED	HXM200	SOLER&PALAU	86,00	96,32	
06008004	11455032	EXTRACTOR HELEICOIDAL PARED	HXM250	SOLER&PALAU	101,00	113,12	
06008006	11455033	EXTRACTOR HELEICOIDAL PARED	HXM350	SOLER&PALAU	150,00	168,00	
06008008	11455098	EXTRACTOR HELEICOIDAL APLICACION DIRECTA	HXB-400/H	SOLER&PALAU	350,00	392,00	
06008010	11455100	EXTRACTOR HELEICOIDAL APLICACION DIRECTA	HXB-400/L	SOLER&PALAU	323,00	361,76	
06008012	11455017	EXTRACTOR HELEICOIDAL APLICACION DIRECTA	HXB-500/H	SOLER&PALAU	459,00	514,08	
06008014	11455018	EXTRACTOR HELEICOIDAL APLICACION DIRECTA	HXB-500/L	SOLER&PALAU	459,00	514,08	
06008016	11455134	EXTRACTOR HELEICOIDAL APLICACION DIRECTA	HXT-500H	SOLER&PALAU	504,00	564,48	
06008018	11455099	EXTRACTOR HELEICOIDAL APLICACION DIRECTA	HXT-630H	SOLER&PALAU	805,00	901,60	
06008020	11455149	EXTRACTOR HELEICOIDAL APLICACION DIRECTA	HXT-630L	SOLER&PALAU	748,00	837,76	
06008022	11455030	EXTRACTOR HELEICOIDAL ALTA EFICIENCIA	HXA/P-4-800/L	SOLER&PALAU	1.648,00	1.845,76	
06008024	11455031	EXTRACTOR HELEICOIDAL ALTA EFICIENCIA	HXA/P-6-1000/L	SOLER&PALAU	1.305,00	1.461,60	
06008026	11455133	EXTRACTOR HELEICOIDAL ALTA EFICIENCIA	HXA/P-4-800/H	SOLER&PALAU	1.195,00	1.338,40	
06010004	11455024	EXTRACTOR HELEICOIDAL T/B/P 1/3HP	HIB-630H	SOLER&PALAU	553,00	619,36	
06010016	06010016	EXTRACTOR HELEICOIDAL T/B/P 1/4HP	HIB-630	SOLER&PALAU	461,00	516,32	
06010002	11455025	EXTRACTOR HELEICOIDAL T/B/P 1/2HP	HIB-800H	SOLER&PALAU	605,00	677,60	
06010006	11455169	EXTRACTOR HELEICOIDAL T/B/P 1/2HP	HIB-800L	SOLER&PALAU	595,00	666,40	
06010008	11455026	EXTRACTOR HELEICOIDAL T/B/P 1HP	HIB-1000H	SOLER&PALAU	620,00	694,40	
06010022	06010022	EXTRACTOR HELEICOIDAL T/B/P 1/2HP 220-440 V.	HIT-1000	SOLER&PALAU	743,00	832,16	
06010010	11455027	EXTRACTOR HELEICOIDAL T/B/P 3/4 HP	HIB-1250	SOLER&PALAU	775,00	868,00	
06010018	06010018	EXTRACTOR HELEICOIDAL T/B/P 3/4HP	HIT-1250	SOLER&PALAU	825,00	924,00	
06010014	11455125	VENTILADOR HELEICOIDAL AGROPECUARIO TI	AGI B/7-800	SOLER&PALAU	565,00	632,80	
06010012	11455124	EXTRACTOR HELEICOIDAL AGROPECUARIO+PER SIANA (1HP)	AGE-1250-1	SOLER&PALAU	1.140,00	1.276,80	
06010020	06010020	EXTRACTOR HELEICOIDAL AGROPECUARIO +PERSIANA (1,5HP)	AGE-1250-1/2	SOLER&PALAU	1.170,00	1.310,40	
EXTRACTOR HELEICOIDAL A PRUEBA DE EXPLOSION							
06008028	11455140	EXTRACTOR HELEICOIDAL ANTIEXPLOSION 1/	HEP-400	SOLER&PALAU	815,00	912,80	
06008032	11455172	EXTRACTOR HELEICOIDAL ANTIEXPLOSION 1/	HEP-500	SOLER&PALAU	929,00	1.040,48	
06008030	11455035	EXTRACTOR HELEICOIDAL ANTIEXPLOSION 3/	HEP-630	SOLER&PALAU	985,00	1.103,20	
EXTRACTOR TUBULAR (TRANSMISION DE BANDA Y POLEA CON MOTOR)				MARCA	PVP	P	S&P
06012002	11455116	EXTRACTOR TUBULAR T/B/P 1/8HP	TTB-250	SOLER&PALAU	416,00	465,92	
06012004	11455022	EXTRACTOR TUBULAR T/B/P 1/8HP	TTB-315	SOLER&PALAU	456,00	510,72	
06012006	11455023	EXTRACTOR TUBULAR T/B/P 1/2HP	TTB-400	SOLER&PALAU	579,00	648,48	
06012010	11455117	EXTRACTOR TUBULAR T/B/P 1/2HP	TTT-400	SOLER&PALAU	579,00	647,36	



TCM FG20T3



Número:	N4
Marca:	TCM
Modelo:	FG20T3
Capacidad:	2.0 Toneladas
Tipo Combustible:	Gas y Gasolina
Llantas:	Neumáticas
Número de Horas:	0 horas. Nuevo
Altura de Elevación:	4.80 metros
Año:	2011
Número de Serie:	2B106392
Tamaño de las uñas:	1.10 metros
Garantía:	1 año / 1000 horas *
Precio:	\$25,551.41

Precio no incluyen IVA.

Equipo Eléctrico



Para más información llame a los teléfonos: 092 789 947 096 258 492

Características Técnicas

PORTEN 3500 WATTS



Marca:	PORTEN
Modelo:	P3500
A/C Salida:	3500W
A/C Salida de Emergencia:	4000W
A/C Voltaje:	120V
A/C Frecuencia:	60 Hz
Amperaje VAC Promedio a 120V:	29
Amperaje VAC Máximo a 120V:	33
Cilindrada del Motor:	196cc
Tipo de Motor:	OHV CPE
Fabricante del Motor:	PORTEN
Potencia del Motor:	6.5 HP
Áceite Recomendado:	SAE30
Encendido:	Manual
Batería:	N/A
Tamaño de Batería:	N/A
Indicador de Nivel Gasolina:	Si
Capacidad del Tanque (Galones):	4 gl
Horas de Operación al 50% con Tanque Llento:	3 hrs
Peso:	99.2 lbs / 45 kg
Alto:	44.5 cm
Ancho:	44.5 cm
Largo:	59.0 cm

Energía**CONELEC**

DIRECCIÓN DE TARIFAS

PERIODO: ENERO - DICIEMBRE

EMPRESA ELÉCTRICA QUITO S.A.

CARGOS TARIFARIOS

RANGO DE CONSUMO	DEMANDA (USD/kW)	ENERGÍA (USD/kWh)	COMERCIALIZACIÓN (USD/consumidor)
CATEGORÍA	RESIDENCIAL		
NIVEL TENSIÓN	BAJA Y MEDIA TENSIÓN		
0-50		0,068	
51-100		0,071	
101-150		0,073	
151-200		0,080	
201-250		0,087	
251-300		0,089	
301-350		0,089	
351-500		0,089	1,414
501-700		0,1185	
701-1000		0,1350	
1001-1500		0,1609	
1501-2500		0,2652	
2501-3500		0,4260	
Superior		0,6712	
	RESIDENCIAL TEMPORAL		
		0,089	1,414

CATEGORÍA	GENERAL		
NIVEL TENSIÓN	GENERAL BAJA TENSIÓN		
0-300 Superior	BAJA TENSIÓN SIN DEMANDA		
	COMERCIAL, E. OFICIALES, BOMBEO AGUA, ESC. DEPORTIVOS, SERVICIO COMUNITARIO		
		0,061 0,084	1,414
0-300 Superior	INDUSTRIAL ARTESANAL		
		0,052 0,084	1,414
0 - 100 101-200 201-300 Superior	ASISTENCIA SOCIAL Y BENEFICIO PÚBLICO		
		0,035 0,038 0,041 0,079	1,414
	CULTOS RELIGIOSOS		
		0,035 0,038 0,041 0,079	1,414

	BAJA TENSIÓN CON DEMANDA		
	COMERCIALES, INDUSTRIALES, E. OFICIALES, BOMBEO AGUA, ESC. DEPORTIVOS, SERVICIO COMUNITARIO, AUTOCONSUMOS Y ABONADOS ESPECIALES		
	4,182	0,068	1,414
07h00 hasta 22h00 22h00 hasta 07h00	BAJA TENSIÓN CON DEMANDA HORARIA		
	4,182	0,068 0,054	1,414
NIVEL TENSIÓN	GENERAL BAJA Y MEDIA TENSIÓN		
0-300 Superior	G.I. BOMBEO AGUA - COMUNIDADES CAMPESINAS DE ESCASOS RECURSOS ECONÓMICOS SIN FINES DE LUCRO		
		0,040 0,040	0,700
	CULTOS RELIGIOSOS CON DEMANDA		
	2,704	0,052	1,414
	ASISTENCIA SOCIAL Y BENEFICIO PÚBLICO CON DEMANDA		
	2,704	0,052	1,414
07h00 hasta 22h00 22h00 hasta 07h00	ASISTENCIA SOCIAL Y BENEFICIO PÚBLICO CON DEMANDA HORARIA		
	2,704	0,052 0,042	1,414

NIVEL TENSIÓN	GENERAL MEDIA TENSIÓN CON DEMANDA		
	COMERCIALES, INDUSTRIALES, E. OFICIALES, BOMBEO AGUA, ESC. DEPORTIVOS SERVICIO COMUNITARIO, AUTOCONSUMOS Y ABONADOS ESPECIALES		
	4,129	0,058	1,414
NIVEL TENSIÓN	MEDIA TENSIÓN CON DEMANDA HORARIA		
	COMERCIALES, E. OFICIALES, BOMBEO AGUA, ESC. DEPORTIVOS SERVICIO COMUNITARIO, AUTOCONSUMOS Y ABONADOS ESPECIALES		
07h00 hasta 22h00 22h00 hasta 07h00	4,129	0,058 0,046	1,414
NIVEL TENSIÓN	MEDIA TENSIÓN CON DEMANDA HORARIA DIFERENCIADA		
	INDUSTRIALES		
L-V 08h00 hasta 18h00 L-V 18h00 hasta 22h00 L-V 22h00 hasta 08h00* S,D,F 18h00 hasta 22h00	4,129	0,058 0,072 0,042 0,068	1,414
NIVEL TENSIÓN	ALTA TENSIÓN CON DEMANDA HORARIA		
	COMERCIALES, E. OFICIALES, BOMBEO AGUA, ESC. DEPORTIVOS SERVICIO COMUNITARIO, AUTOCONSUMOS Y ABONADOS ESPECIALES		
07h00 hasta 22h00 22h00 hasta 07h00	4,053	0,051 0,046	1,414
NIVEL TENSIÓN	ALTA TENSIÓN CON DEMANDA HORARIA DIFERENCIADA		
	INDUSTRIALES		
L-V 08h00 hasta 18h00 L-V 18h00 hasta 22h00 L-V 22h00 hasta 08h00* S,D,F 18h00 hasta 22h00	4,053	0,051 0,063 0,041 0,051	1,414
CATEGORÍA	ALUMBRADO PÚBLICO		
	2,569	0,009	



Oficina Principal Quito: Aldana Oe4-11 y Ruiz
de Castilla
Telfs.: 2562-039 / 2235-270 Telefax: 2222-080
Apartado: 17-11-04827 CCNU QUITO

E-mail : venamet@uio.satnet.net



ATT.: CIUDAD: FECHA:	DIEGO CRIOLLO QUITO 21/08/2013	 PROFORMA 3991/13
----------------------------	---	--

ITEM	CANTIDAD	DESCRIPCION	Precio Unitario	TOTAL
1	1	P265F QUEMADOR PARA GAS CAPACIDAD DE 65.000 A 200.000 BTU	800,00	800,00
		SUBTOTAL		800,00
		+ 12% I.V.A.		96,00
		TOTAL		896,00

CONDICIONES DE PAGO :

CONTADO

TIEMPO ENTREGA :

INMEDIATO

VALIDO POR :

15 DIAS

Carmen Figueroa
DIVISION INDUSTRIAL

Variación porcentual anual del índice general nacional

MESES AÑOS	MESES												Promedio Anual
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	
2000	78,07	90,84	80,88	88,88	96,87	103,68	102,34	104,01	107,87	104,93	96,80	91,00	95,51
2001	78,69	67,12	58,78	46,55	39,61	33,20	30,43	29,24	27,20	25,31	24,62	22,44	40,26
2002	16,53	14,44	13,24	12,99	13,36	13,25	12,90	12,90	11,28	10,70	9,71	9,36	12,55
2003	10,09	9,76	9,15	8,59	8,25	7,62	7,72	7,32	7,55	6,86	6,48	6,07	7,95
2004	3,92	3,84	3,98	3,65	2,97	2,87	2,20	2,17	1,60	1,88	1,97	1,95	2,75
2005	1,78	1,36	0,92	1,10	1,77	2,15	2,62	2,45	2,94	3,02	2,76	3,13	2,17
2006	3,37	3,82	4,23	3,43	3,11	2,80	2,99	3,36	3,21	3,21	3,21	2,87	3,30
2007	2,68	2,03	1,47	1,39	1,56	2,19	2,58	2,44	2,58	2,36	2,70	3,32	2,28
2008	4,19	5,10	6,56	8,18	9,29	9,69	9,87	10,02	9,97	9,85	9,13	8,83	8,39
2009	8,36	7,85	7,44	6,52	5,41	4,54	3,85	3,33	3,29	3,50	4,02	4,31	5,20
2010	4,44	4,31	3,35	3,21	3,24	3,30	3,40	3,82	3,44	3,46	3,39	3,33	3,56
2011	3,17	3,39	3,57	3,88	4,23	4,28	4,44	4,84	5,39	5,50	5,53	5,41	4,47
2012	5,29	5,53	6,12	5,42									
Promedio	5,13	5,10	4,84	4,51	4,52	4,51	4,41	4,43	4,44	4,30	4,06	3,86	

Tasa de interés activa



FECHA	VALOR
Mayo-31-2012	8.17 %
Abril-30-2012	8.17 %
Marzo-31-2012	8.17 %
Febrero-29-2012	8.17 %
Enero-31-2012	8.17 %
Diciembre-31-2011	8.17 %
Noviembre-30-2011	8.17 %
Octubre-31-2011	8.17 %
Septiembre-30-2011	8.37 %
Agosto-31-2011	8.37 %
Julio-31-2011	8.37 %
Junio-30-2011	8.37 %
Mayo-31-2011	8.34 %
Abril-30-2011	8.34 %
Marzo-31-2011	8.65 %
Febrero-28-2011	8.25 %
Enero-31-2011	8.59 %
Diciembre-31-2010	8.68 %
Noviembre-30-2010	8.94 %
Octubre-30-2010	8.94 %
Septiembre-30-2010	9.04 %
Agosto-31-2010	9.04 %
Julio-31-2010	8.99 %
Junio-30-2010	9.02 %

ANEXO 3
PLANOS