

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

"Diseño de una cámara de tratamiento térmico para pallets de madera."

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

Materia Integradora

Previo la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentado por:

Marco Antonio Robalino López

Jan Pouling Diaz Ayala

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2017

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos este proyecto integrador a todos los que conforman la Escuela Superior Politécnica del Litoral, lugar donde hemos realizado parte de nuestra formación académica y personal, a nuestro tutor de tesis por su gran aporte e interés brindado. Y finalmente a nuestras familias por su incondicional apoyo a lo largo de nuestra vida.

Atentamente

Jan Diaz Ayala

Marco Robalino López

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido desarrollado en la presente propuesta de la materia integradora corresponde exclusivamente al equipo conformado por:

Jan Pouling Diaz Ayala

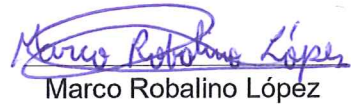
Marco Antonio Robalino López

Msc. Gonzalo Zabala Ortiz

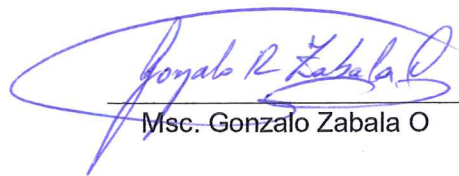
y el patrimonio intelectual del mismo a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP) de la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”.



Jan Pouling Diaz Ayala



Marco Robalino López



Msc. Gonzalo Zabala O

RESUMEN

El tratamiento térmico de pallets consiste en la esterilización de la madera mediante la aplicación de calor y/o control de humedad hasta alcanzar ciertas especificaciones, de esta manera se previene la proliferación de plagas en los pallets. En la actualidad el mercado ecuatoriano de pallets de madera exige que se cumplan las normas propuestas por la NIMF N°15. Se propone como objetivo principal el diseño de una cámara para tratamiento térmico de pallets de madera de alto desempeño, energéticamente eficiente y segura. Para ello es necesario determinar la carga térmica y combustible sustituto para menores costos energéticos, seleccionar los materiales, equipos e instrumentación requeridos y diseñar un dispositivo para transferir el calor hacia los pallets de madera. Para este proyecto se utilizó el método de diseño de ingeniería en el cual se define primero el problema, después se proponen soluciones, se compara con el mercado actual y una vez seleccionada la solución final se realizan los cálculos y diseño final. Se hizo uso de herramientas de softwares de diseño, y software de programación como lo son Solidworks y Matlab.

Se obtuvo la carga térmica dentro de la cámara, se diseñó un intercambiador de calor, tal que, éste se ajuste a los requerimientos de eficiencia y costos propuestos por el cliente. En la simulación realizada se obtuvo homogeneidad en la distribución de temperatura en la cámara y en el interior de los pallets. Se diseñó un intercambiador de flujo cruzado, con un arreglo de banco de tubos, con dimensiones totales de 0.65x0.65x1 metros. La temperatura dentro de la cámara será de 120°C garantizando el proceso de sanitizado en aproximadamente 2 horas. Se utilizaron modelos ingenieriles para representar teóricamente el comportamiento de varios factores en el sistema y se logró simular con eficacia cómo se comportará el flujo de aire a través de los pallets de madera; logrando así cumplir los objetivos planteados de manera satisfactoria

Palabras Clave: Carga térmica, intercambiador de calor, eficiencia energética, transferencia de calor.

ABSTRACT

Pallets' heat treatment consist on the sterilization of wood by heat application or humidity control until it reaches certain specifications, preventing the proliferation of pests through the pallets. Currently, the Ecuadorian market of wood pallets requires compliance with the standards proposed by ISPM No. 15. The main objective is to design a high-performance heat treatment chamber for wooden pallets, energy efficient. To do this, it is necessary to determine the thermal load and substitute fuel for lower energy costs, select the required materials, equipment and instrumentation and design a device to transfer heat to the wooden pallets. For the development of this project, it was used the engineering design method in which the problem is first defined, then solutions are proposed, compared to the current market, and once the final solution is selected, calculations and final design are performed. It was used design and programming software tools, such as Solidworks and Matlab. The thermal load was obtained inside the chamber, a heat exchanger was designed, so that it meets the requirements of efficiency and costs proposed by the client. In the simulation performed, homogeneity of temperature distribution was obtained in the chamber and inside the pallets. A cross flow heat exchanger was designed with a bank of tubes arrangement, and with 0.65x0.65x1 meters for total dimensions. The temperature inside the chamber will be 120°C guaranteeing the sanitizing process in approximately 2 hours. Engineering models were used to represent theoretically the behavior of several factors in the system. It was possible to simulate effectively how the air flow will behave through the wooden pallets; so that the proposed objectives in this project were satisfactorily fulfilled.

Keywords: Thermal load, heat exchanger, energy efficiency, heat transfer.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
ÍNDICE GENERAL.....	iii
ABREVIATURAS	v
SIMBOLOGÍA.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE PLANOS.....	x
CAPÍTULO 1	1
1. Introducción.....	1
1.1 Descripción del problema	1
1.2 Objetivos	1
1.2.1 Objetivo General.....	1
1.2.2 Objetivos Específicos.....	2
1.3 Marco teórico	2
1.3.1 Pallets de madera	2
1.3.2 Dimensiones	3
1.3.3 Propiedades de la madera	4
1.3.4 Proceso de Fabricación	5
1.3.5 Normas y Regulaciones.....	5
1.3.6 Tratamiento de sanitización y secado	5
1.3.7 Equipos Existentes	6
CAPÍTULO 2	8
2. Metodología de diseño	8
2.1 Lista Preliminar de las Necesidades del Cliente	8
2.2 Análisis de las necesidades del cliente.....	9

2.3	Jerarquización de Atributos de Diseño	10
2.4	Especificaciones	13
2.5	Estructura Funcional	17
2.6	Selección de conceptos	19
2.7	Cálculos: Carga Térmica, Pérdidas Térmicas, Intercambiador de calor.....	23
2.7.1	Temperatura del Aire	24
2.7.2	Pérdidas Térmicas.....	27
2.7.3	Carga Térmica.....	33
2.7.4	Temperatura de flama adiabática.....	34
2.7.5	Flujo másico de aire.....	36
2.7.6	Simulación	38
2.7.7	Intercambiador de Calor	40
2.7.8	Selección del ventilador	46
2.7.9	Sistema contra incendios.....	47
CAPÍTULO 3.....		49
3.	Resultados	49
3.1	Resumen de Resultados	49
3.2	Ventajas Económicas del Diseño.....	55
3.2.1	Costos actuales de operación.....	55
3.2.1	Mejora de diseño	56
CAPÍTULO 4.....		58
4.	Discusión y Conclusiones.....	58
4.1	Discusión	58
4.2	Conclusiones.....	59
4.3	Recomendaciones.....	60
BIBLIOGRAFÍA		61
APÉNDICES		63

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
IPPC	Convención Internacional de Protección Fitosanitaria
EPAL	European Pallet Association
ISO	International Organization for Standardization
NIMF	Norma Internacional para Medidas Fitosanitarias
OMS	Organización Mundial de la Salud
GLP	Gas licuado de petróleo

SIMBOLOGÍA

m	Metros
mm	Milímetros
°C	Grados centígrados
dB	Decibeles
PM	Picomolar
Cu	Cobre
N	Nitrógeno
C	Carbono
H	Hidrógeno
O	Oxígeno
μg	Microgramos
W	Watts
K	Kelvin
kW	Kilowatts
s	Segundos
Kg	Kilogramos
kJ	Kilojoules
gal	Galones
h	Horas
Pa	Pascales
Bi	Biot
Fo	Fourier
Nu	Nusselt

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Pallet de madera	3
Figura 1.2 Dimensiones del Pallet Standard.....	4
Figura 1.3 Etapas de Fabricación de los Pallets de madera	5
Figura 1.4 Interior de la cámara de tratamiento térmico convencional.....	7
Figura 1.5 Configuración para la Combustión de GLP	7
Figura 2.1 Metodología de diseño	8
Figura 2.2 Árbol de objetivos jerarquizados.....	13
Figura 2.3 Caja transparente para nuestro diseño.....	17
Figura 2.4 Intercambiador de calor compacto de flujo cruzado [9].....	19
Figura 2.5 Intercambiador de calor de tubos con aletas [9]	19
Figura 2.6 Curva de calentamiento de la madera	23
Figura 2.7 Modelo tridimensional para conducción transiente	24
Figura 2.8 Descomposición del modelo tridimensional	25
Figura 2.9 Efecto de la temperatura del aire en el tiempo de calentamiento.....	27
Figura 2.10 Esquema de la composición de las paredes y su circuito térmico	28
Figura 2.11. Modelo de sólido semi-infinito	31
Figura 2.12 Gráfica del calor transferido al suelo en función del tiempo	32
Figura 2.13 Historial de temperaturas en un sólido semi-infinito con convección	33
Figura 2.14 Esquema de la cámara de combustión.....	35
Figura 2.15 Esquema de la cámara como volumen de control	36
Figura 2.16 Modelo para los procesos de acondicionamiento de aire utilizado	36
Figura 2.17 Descripción geométrica del diseño	39
Figura 2.18 Corte longitudinal del diseño	39
Figura 2.19 Esquema del Intercambiador de calor	40
Figura 2.20 Geometría para el arreglo de banco de tubos	41
Figura 2.21. Efectividad de intercambiadores de calor de flujo cruzado con un fluido mezclado y otro no mezclado.....	42
Figura 2.22 Relación de número de Reynolds y el factor de fricción de tuberías.....	46
Figura 3.1 Distribución de temperatura del aire en el interior de la cámara	50
Figura 3.2 Distribución de temperatura de los sólidos	50
Figura 3.3 Intercambiador de calor diseñado	52
Figura 3.4. Curva característica de ventilador HCT 45-2T-2.....	53

Figura 3.5 Quemador de diésel53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Jerarquización de las categorías de los atributos de diseño.	10
Tabla 2.2 Jerarquización de los atributos de Desempeño.	10
Tabla 2.3 Jerarquización de los atributos de Seguridad.	11
Tabla 2.4 Jerarquización de los atributos de Costos.	11
Tabla 2.5 Jerarquización de los atributos de Costos.	12
Tabla 2.6 Necesidades del clientes pesadas y ordenadas jerárquicamente.	12
Tabla 2.7 Matriz Objetivos-Métricas para nuestro diseño	16
Tabla 2.8 Carta morfológica.	19
Tabla 2.9 Matriz de decisión del combustible.	20
Tabla 2.10 Matriz de decisión del intercambiador de calor.	21
Tabla 2.11 Matriz de decisión del aislante.	21
Tabla 2.12 Matriz de decisión del sistema de extracción de humedad.	22
Tabla 2.13 Requisitos de suministro de agua para sistemas de rociadores.....	48
Tabla 3.1 Desglose de costos de materiales	54
Tabla 3.2 Desglose de costos de equipos	55
Tabla 3.3 Costo total de cámara.....	55
Tabla 3.4 Análisis de costos de producción anual actual.....	56
Tabla 3.5 Análisis de costos de producción con mejora.	56

ÍNDICE DE PLANOS

- PLANO 1 Cámara Completa
- PLANO 2 Interior de la Cámara
- PLANO 3 Dimensiones de la cámara
- PLANO 4 Ensamble del Ducto de Ventilación
- PLANO 5 Distribución de Pallets
- PLANO 6 Dimensiones del Sistema de Ventilación
- PLANO 7 Dimensiones de Ductos Individuales
- PLANO 8 Intercambiador de Calor
- PLANO 9 Arreglo de Banco de Tubos

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del problema

El tratamiento térmico de pallets de madera previene la propagación de plagas peligrosas a través de la esterilización. La Convención Internacional de Protección Fitosanitaria (IPPC) en 2002 adoptó un estándar llamado NIMF N°15 para la fumigación y marcado obligatorio de las tarimas de madera y pallets. La nueva normativa aplica para embalajes de madera (pallets) tratados térmicamente que se utiliza en el comercio internacional.

El tratamiento térmico consiste básicamente en la esterilización de la madera mediante la aplicación de calor y/o control de humedad hasta alcanzar ciertas especificaciones. Se transfiere calor a la madera hasta alcanzar una temperatura mínima al centro de ésta de 56°C, por un tiempo mínimo de 30 minutos. Con este sistema se logra eliminar los insectos que habitan al interior del material que provocan las temidas plagas. (AGROCALIDAD, 2015)

Actualmente el proceso de sanitización de pallets llevado a cabo por varios productores ubicados en el cantón Durán, en las afueras de la parroquia Eloy Alfaro, se realiza utilizando gas licuado como combustible lo cual se traduce en altos costos energéticos; y también se tienen otros inconvenientes tal como una duración demasiado prolongada para el proceso, o la necesidad de otro adicional, para el secado posterior en el cual se pueden tomar semanas para alcanzar los niveles de humedad requeridos por sus clientes (Ecuapallets, 2017). Por lo tanto, existe la necesidad del diseño de una cámara de tratamiento térmico para pallets de madera que sea más energéticamente eficiente, con menores costos, en la que se alcancen los niveles de humedad deseados y que requiera menos tiempo para lograrlo.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

- Diseñar una cámara para tratamiento térmico de pallets de madera de alto desempeño, energéticamente eficiente y segura.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Determinar la carga térmica y combustible sustituto para menores costos energéticos.
- Seleccionar los materiales, equipos e instrumentación requeridos.
- Diseñar un dispositivo para transferir el calor hacia los pallets de madera.
- Realizar la integración de todos los sistemas e instrumentos requeridos para la operación de la cámara.

1.3 Marco teórico

1.3.1 Pallets de madera

En primer lugar, se debe estar al tanto de las generalidades de los pallets de madera puesto que de esta forma se podrá determinar posteriormente la carga térmica para el diseño a realizarse. Entre los puntos importantes, interesa conocer su masa, dimensiones y específicamente el tipo de madera empleado en su fabricación junto con las propiedades térmicas de la misma.

Básicamente un pallet de madera es una plataforma de carga que facilita el transporte internacional de mercancías, está compuesto de un piso superior formado de tablas regularmente espaciadas, bloques de madera, travesaños y patines. De acuerdo con los requerimientos del usuario se pueden tener pallets de distintos tamaños, con distintas cantidades de sus respectivos componentes, puesto que de acuerdo con el producto o mercancía que se vaya a transportar será más conveniente utilizar alguna variación en especial. Por ejemplo, se definen variantes específicas para los pallets que transportan medicinas, productos alimenticios y líquidos (EPAL, 2017).

En la figura 1.1 se puede observar a continuación un pallet estándar de madera con el detalle de sus componentes:

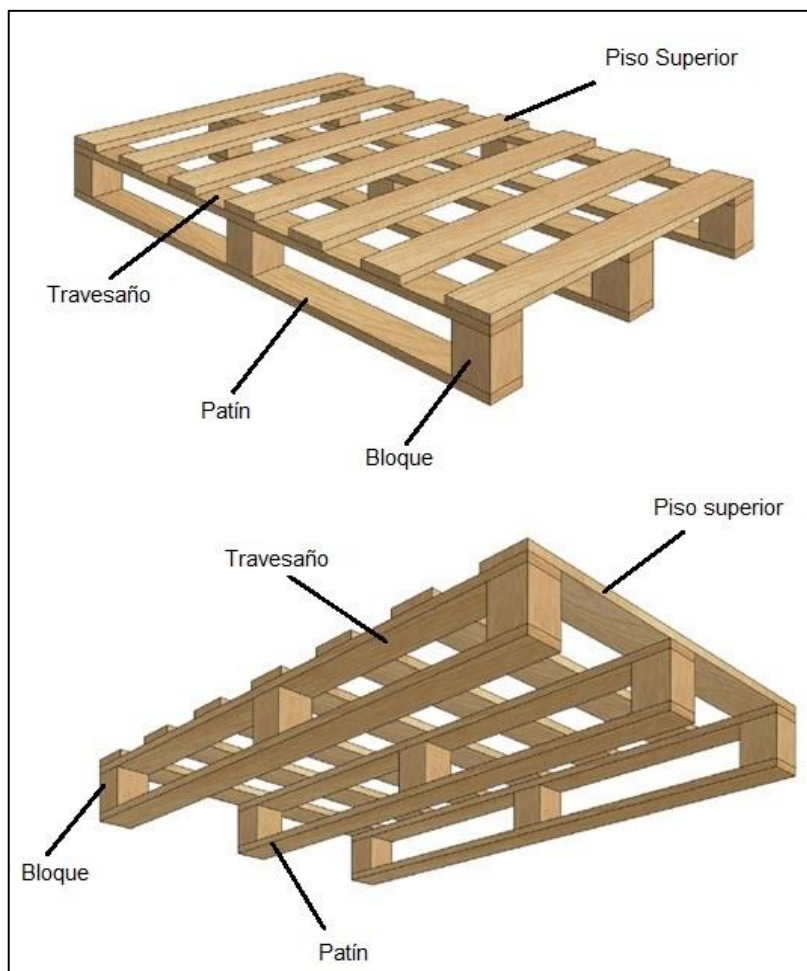


Figura 1.1. Pallet de madera

Elaboración Propia.

1.3.2 Dimensiones

Considerando la normativa internacional, se tienen dos tipos de pallets: el europeo y el universal; el primero es estandarizado por la EPAL (European Pallet Association) mientras que el segundo por la ISO (International Organization for Standardization), siendo estas entidades las que establecen las dimensiones requeridas para cada uno de ellos. En este punto, cabe resaltarse que el pallet europeo es el más común en el mercado local, específicamente para los productores consultados que se ubican en la parroquia Eloy Alfaro del cantón Durán; por lo cual en la figura 1.2 se presentan sus dimensiones en milímetros:

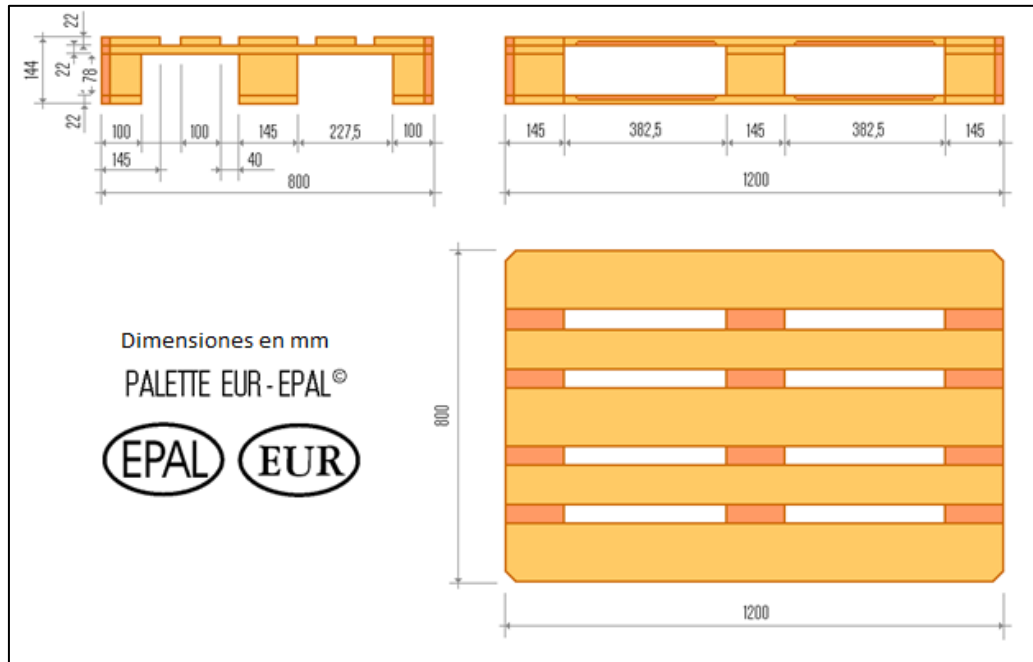


Figura 1.2 Dimensiones del Pallet Standard

Fuente: [1] EPAL, 2017.

Adicionalmente, también se conoce que la masa aproximada para el pallet europeo es de 12 kg (EPAL, 2017).

1.3.3 Propiedades de la madera

Para el desarrollo del diseño será necesario conocer varias propiedades térmicas de la madera utilizada para la fabricación de los pallets, entre ellas se requiere la densidad, conductividad térmica, calor específico y contenido de humedad. El tipo de madera comúnmente utilizado por los fabricantes consultados que se ubican en la parroquia Eloy Alfaro del cantón Durán es el pino, por lo tanto, sus propiedades serían las siguientes¹ (Incropera, 2013):

$$\text{Densidad: } \rho = 510 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Conductividad Térmica: } k = 0.12 \text{ W/mK}$$

$$\text{Calor específico: } c = 1380 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$$

$$\text{Humedad relativa: } w = 30 - 40 \%$$

¹ Las propiedades fueron tomadas de la tabla A.3 de la referencia [2]

1.3.4 Proceso de Fabricación

Para el proceso de fabricación de pallets se siguen las etapas detalladas a continuación en la figura 1.3:

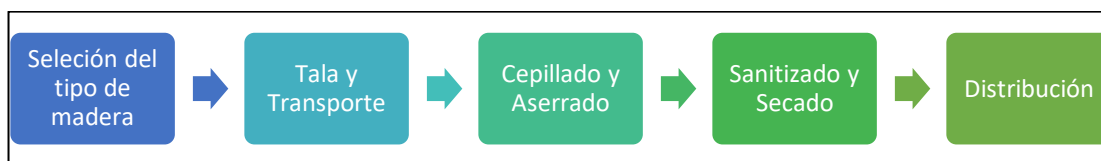


Figura 1.3 Etapas de Fabricación de los Pallets de madera

Elaboración Propia

Y cabe destacarse que dentro de este proceso se incluye una etapa de sanitizado y secado, donde se trata la madera para prevenir la propagación de plagas. Adicionalmente se acota que los fabricantes nacionales manejan lotes de producción de 250 pallets debido a limitaciones de transporte y acuerdos con los clientes (Ecuapallets, 2017).

1.3.5 Normas y Regulaciones

En marzo del 2002, la IPPC (International Plant Protection Convention) emitió regulaciones obligatorias para los embalajes de madera usados en el transporte de mercancías dentro del mercado internacional, incluyendo pallets de madera, carretes, tarimas, entre otros; específicamente se la llamó NIMF N°15 (Norma Internacional para Medidas Fitosanitarias) cuya última revisión se publicó en 2009, y en ella se describen los requisitos que deben cumplirse para que el uso de un embalaje de madera sea aprobado internacionalmente, asegurando así la prevención de plagas. Con este objetivo, se exige que los embalajes de madera sean tratados previamente mediante un proceso de sanitización, el cual normalmente es un tratamiento térmico o uno químico; cabe resaltarse que el de interés será el tratamiento térmico. (AGROCALIDAD, 2015)

1.3.6 Tratamiento de sanitización y secado

La NIMF N°15 establece que para realizar el tratamiento térmico se debe elevar la temperatura de la madera hasta 56°C y mantenerla así durante como mínimo 30 minutos. En el caso de los productores consultados, no manejan directamente la normativa internacional, sino que son sometidos a inspecciones regulares por

parte de los funcionarios de Agrocalidad [3] en las cuales adicionalmente a los requerimientos anteriores, también se exige por lo menos dos mediciones de temperatura y que éstas sean en el interior de la madera, realizadas con termocuplas tipo K y con una frecuencia mínima de una medición por cada 3 minutos. Finalmente, también se hace énfasis en que exista una buena ventilación durante el proceso. (Ecuapallets, 2017)

1.3.7 Equipos Existentes

El proceso de sanitizado es llevado a cabo en una cámara de tratamiento térmico, dentro de la cual se expone la madera a un ambiente de temperatura y humedad controladas. Los dos tipos de cámara más utilizados son la convencional y la de deshumidificación; en la primera se calienta aire atmosférico con un intercambiador de calor, se lo ingresa a la cámara, luego fluye alrededor de los pallets de madera, para posteriormente ser evacuado a través de los extractores ubicados en la parte superior junto con el vapor absorbido. Se advierte entonces que, en las cámaras de tratamiento térmico convencional, se requiere de algún combustible para generar el calor necesario, y al no haber recirculación de aire podrían tenerse costos energéticos considerables.

En cambio, una cámara térmica con deshumidificación no consume combustible, sino que el calor necesario es generado con una bomba de calor, y además si se recircula el aire para tener menor consumo energético. En ella se eleva la temperatura del aire con la bomba de calor, y luego de fluir alrededor de la madera, se lo enfría para condensar la humedad transferida al mismo; cabe resaltar entonces que su funcionamiento es más complejo y costoso. (Nyle Systems, 2017).

Finalmente se detalla que los equipos utilizados por los fabricantes consultados en el cantón Durán, son del tipo convencional, pero presentan varios inconvenientes; en primer lugar, el combustible utilizado es gas licuado de petróleo, el cual tiene un costo considerable en comparación a otros, y, además no se realiza una transferencia de calor hacia el aire y luego a la madera, sino que se ingresa a la cámara directamente los productos de la combustión provocando incendios; de la misma manera se considera que el tiempo que requieren sus

cámaras de tratamiento térmico es demasiado prolongado puesto que les toma alrededor de 3 horas. En último lugar se advierte cierto nivel de riesgo al usar sus equipos, puesto que anteriormente ya han sufrido de inicios de incendio dentro de sus cámaras, debido a las altas temperaturas de los gases de combustión. (Ecuapallets, 2017)

A continuación, se ilustran los equipos existentes en la figura 1.4 y la figura 1.5:



Figura 1.4 Interior de la cámara de tratamiento térmico convencional

Fuente: Ecuapallets - 2017



Figura 1.5 Configuración para la Combustión de GLP

Fuente: Ecuapallets - 2017

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA DE DISEÑO

A continuación, en la figura 2.1 se observa el proceso de diseño que se llevará a cabo.

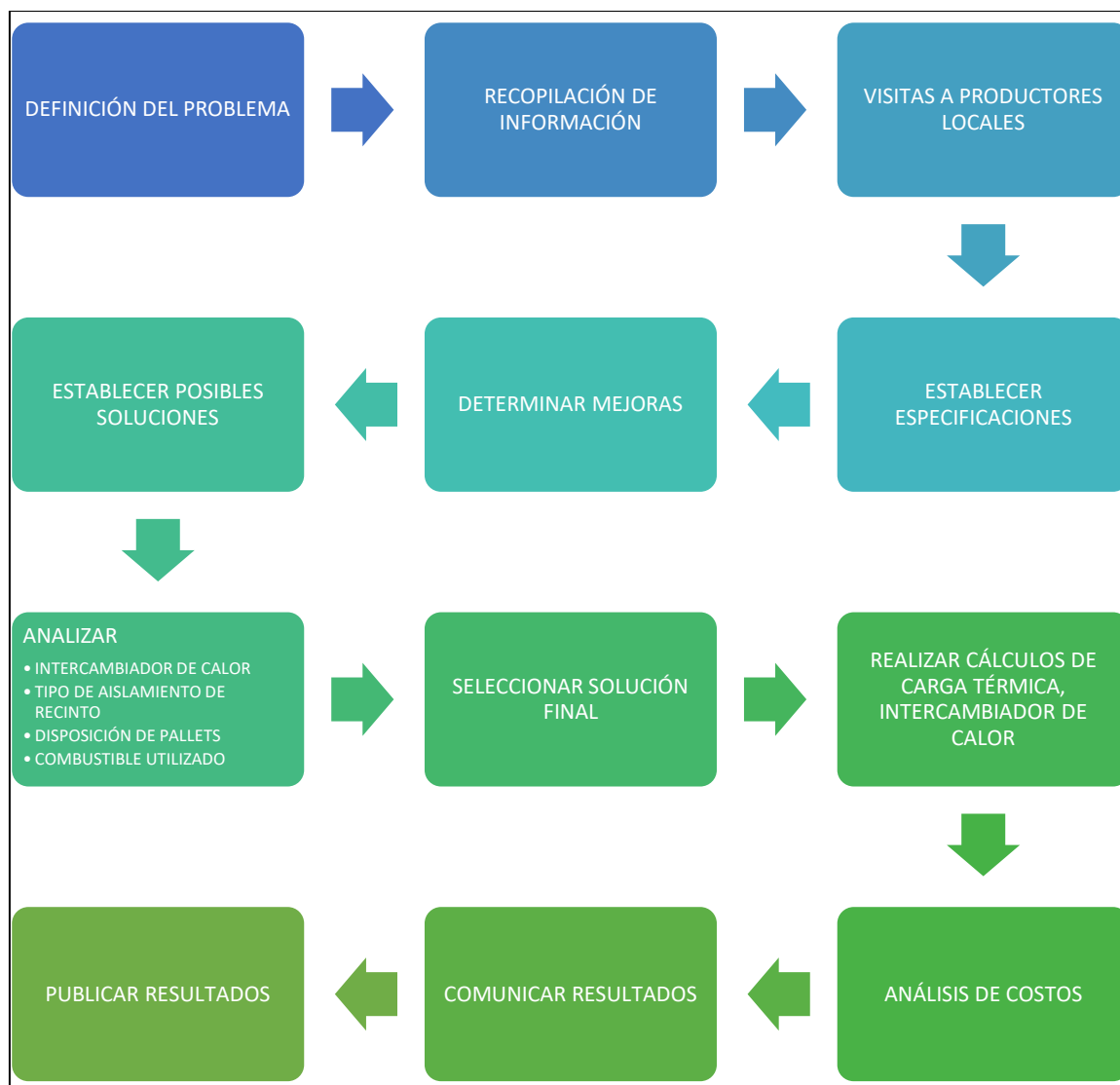


Figura 2.1 Metodología de diseño

Elaboración Propia

2.1 Lista Preliminar de las Necesidades del Cliente

En este punto, de manera general se describe lo que los productores de pallets de madera requieren para cumplir el proceso de sanitizado de mejor manera:

- ◆ Capacidad para 250 pallets de madera
- ◆ Alcanzar una temperatura de 56°C durante 30 minutos

- ◆ Lograr los niveles de humedad deseados: 20%
- ◆ No debe ser muy grande
- ◆ Detención inmediata del funcionamiento en caso de emergencia.
- ◆ No debe sufrir de incendios
- ◆ Fácil de usar y limpiar
- ◆ Protegida de la lluvia
- ◆ Bajo ruido
- ◆ Bajo costo de operación
- ◆ Bajo costo de mantenimiento
- ◆ Buena apariencia
- ◆ Bajo costo de manufactura
- ◆ Resistente a la corrosión
- ◆ No debe provocar una excesiva contaminación
- ◆ Su funcionamiento no debe requerir mucho tiempo
- ◆ Que no requiera supervisión continua

2.2 Análisis de las necesidades del cliente

La lista preliminar de necesidades del cliente fue resumida, separadas en cuatro grupos principales y ordenada jerárquicamente.

Objetivos/Atributos

1. DESEMPEÑO

- 1.1. Capacidad de 250 pallets
- 1.2. Alcanzar requerimientos de temperatura, humedad y tiempo
- 1.3. No genere una excesiva contaminación
- 1.4. Bajo esfuerzo de operación por parte del usuario
- 1.5. Fácil de limpiar

2. SEGURIDAD

- 2.1. Detención inmediata en caso de emergencia
- 2.2. Que no sufra de incendios

3. COSTO

- 3.1. Bajo costo de operación
- 3.2. Bajo costo de manufactura

3.3. Bajo costo de mantenimiento

4. APARIENCIA

4.1. Resistente a la corrosión

4.2. No muy grande y de buena apariencia

4.3. Bajo ruido

2.3 Jerarquización de Atributos de Diseño

Ahora se debe ordenar de acuerdo con su importancia cada uno de los objetivos o atributos para nuestro diseño, se empezará por la tabla 2.1 con las categorías generales, y se utilizará una escala del 1 al 10 indicando la importancia relativa de cada uno de los atributos, siendo 1 el valor para indicar igual importancia.

Tabla 2.1 Jerarquización de las categorías de los atributos de diseño.

CRITERIO	Desempeño	Seguridad	Costo	Apariencia	TOTAL	PESO
Desempeño	1	2	3	8	14	0.41
Seguridad	0.5	1	2	8	11.5	0.34
Costo	0.333	0.5	1	5	6.833	0.20
Apariencia	0.125	0.5	0.2	1	1.825	0.05
TOTAL					34.158	1.00

Elaboración Propia

Luego se repite, en las tablas 2.2 a la 2.5, el proceso de jerarquización para cada categoría de los atributos u objetivos de diseño, y se obtiene su peso absoluto. Éste dato luego se resumen en la tabla 2.6:

Tabla 2.2 Jerarquización de los atributos de Desempeño.

CRITERIO	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	TOTAL	PESO RELATIVO	PESO ABSOLUTO
1.1	1	1	2	4	8	16	0.357	0.146
1.2	1	1	2	4	5	13	0.290	0.119
1.3	0.5	0.5	1	2	4	8	0.178	0.073
1.4	0.25	0.25	0.5	1	4	6	0.134	0.056
1.5	0.125	0.2	0.25	0.25	1	1.825	0.041	0.017
TOTAL						44.825	1	0.41

Elaboración Propia

Criterios

- 1.1. Capacidad de 250 pallets
- 1.2. Alcanzar requerimientos de temperatura, humedad y tiempo
- 1.3. No genere una excesiva contaminación
- 1.4. Bajo esfuerzo de operación por parte del usuario
- 1.5. Fácil de limpiar

Tabla 2.3 Jerarquización de los atributos de Seguridad.

CRITERIO	2.1	2.2	TOTAL	PESO RELATIVO	PESO ABSOLUTO
2.1	1	2	3	0.666	0.227
2.2	0.5	1	1.5	0.334	0.113
	TOTAL		4.5	1	0.34

Elaboración Propia

Criterios

- 2.1 Para fácil e inmediatamente
- 2.2 Que no sufra de incendios

Tabla 2.4 Jerarquización de los atributos de Costos.

CRITERIO	3.1	3.2	3.3	TOTAL	PESO RELATIVO	PESO ABSOLUTO
3.1	1	2	4	7	0.571	0.114
3.2	0.5	1	2	3.5	0.286	0.057
3.3	0.25	0.5	1	1.75	0.143	0.029
	TOTAL			12.25	1	0.2

Elaboración Propia

Criterios

- 3.1 Costo de operación
- 3.2 Costo de manufactura
- 3.3 Costo de mantenimiento

Tabla 2.5 Jerarquización de los atributos de Costos.

CRITERIO	4.1	4.2	4.3	TOTAL	PESO RELATIVO	PESO ABSOLUTO
4.1	1	3	4	8	0.611	0.030
4.2	0.333	1	2	3.333	0.255	0.013
4.3	0.25	0.5	1	1.75	0.134	0.007
TOTAL				13.083	1	0.05

Elaboración Propia

Crterios

- 4.1 Resistencia a la corrosión
- 4.2 No muy grande y de buena apariencia
- 4.3 Bajo ruido

Tabla 2.6 Necesidades del clientes pesadas y ordenadas jerárquicamente.

Objetivos	Peso Absoluto	Peso Relativo
1. Desempeño	0.41	1
1.1. Capacidad de 250 pallets.	0.146	0.357
1.2. Alcanzar requerimientos de temperatura, humedad y tiempo.	0.119	0.290
1.3. No genere una excesiva contaminación.	0.073	0.178
1.4. Bajo esfuerzo de operación por parte del usuario.	0.056	0.134
1.5. Fácil de limpiar.	0.017	0.041
2. Seguridad	0.34	1
2.1. Detenimiento inmediato en caso de emergencia.	0.227	0.666
2.2. Que no sufra de incendios.	0.113	0.334
3. Costo	0.21	1
3.1 Costo de operación	0.114	0.571
3.2 Costo para el cliente	0.057	0.286
3.3 Costo de mantenimiento	0.029	0.143
4. Apariencia	0.05	1
4.1 Resistencia a la corrosión	0.030	0.611
4.2 No muy grande y de buena apariencia	0.013	0.255
4.3 Bajo ruido	0.007	0.134

Elaboración Propia

Finalmente se presenta el árbol de objetivos jerarquizados en la figura 2.2:

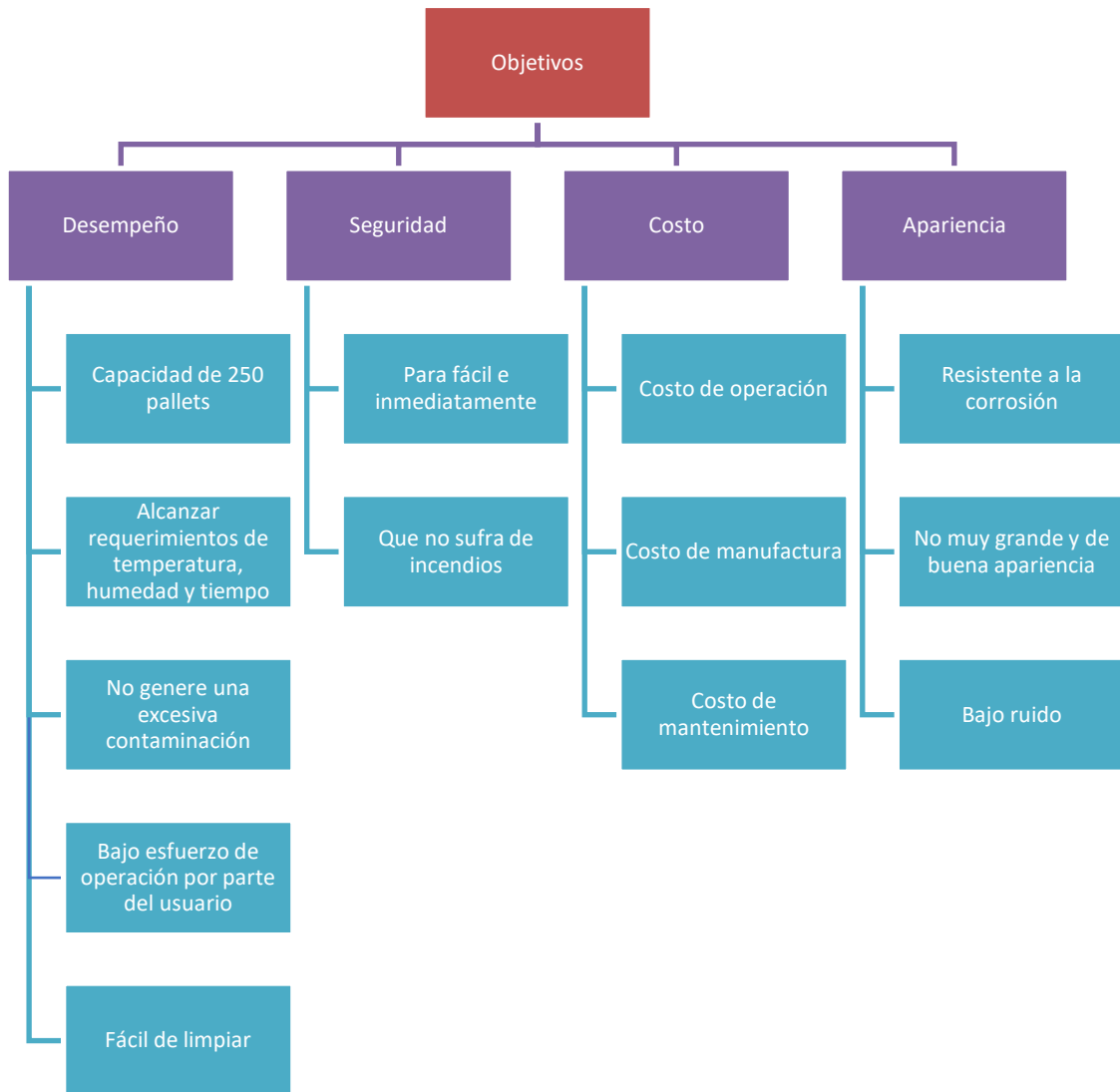


Figura 2.2 Árbol de objetivos jerarquizados

Elaboración Propia

2.4 Especificaciones

Para poder verificar si se están cumpliendo los objetivos, se los han traducido en especificaciones técnicas que expresan cuantitativamente los atributos de la máquina. Estos fueron establecidos arbitrariamente, pero tomando en consideración: la competencia, equipos existentes, normas aplicables, necesidades del cliente, etc.

- Dimensiones máximas de 7.5 m x 4.5 m x 3 m.

- Capacidad de 250 pallets de madera.
- Se debe alcanzar una temperatura de 56°C durante por lo menos 30 minutos.
- Todo el proceso debe tener una duración menor a 3 horas
- Se debe tomar mediciones de temperatura cada 3 minutos
- Se deben usar termocuplas tipo K para la medición de temperatura en el interior de la madera
- Debe haber por lo menos dos puntos de toma de datos, que deben incluir el punto más alejado de la fuente de calor.
- La humedad requerida debe ser menor al 25%
- No debe requerirse supervisión del usuario.
- No se deben alcanzar temperaturas de ignición de la madera en el interior de la cámara.
- Posee sistema contra incendios.
- Se detiene en menos de 3 segundos
- Máximo 4 pasos para operar
- Ruido menor a 85 dB²
- Se desea menos de 1 hora de limpieza a la semana
- Debe ser pintada para protegerla contra la corrosión
- Máximo costo de operación de \$ 130 por ciclo de trabajo con un lote de 250 pallets [7]
- Máximo costo de mantenimiento de \$ 800 anuales incluyendo materiales y mano de obra [7]
- Máximo costo de manufactura de \$ 10500 para una capacidad de 250 pallets [7]
- Concentración de PM₁₀³ menor a 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24 horas continuas y menor a 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en promedio anual.
- Concentración de PM_{2.5}⁴ menor a 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24 horas continuas y menor a 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en promedio anual.
- Concentración de dióxido de azufre (SO_2) menor a 125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24 horas continuas, menor a 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 10 minutos y menor a 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en promedio anual.

² Nivel recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para ambientes laborales

³ Material particulado de diámetro menor a 10 μm

⁴ Material particulado de diámetro menor a 2.5 μm

- Concentración de monóxido de carbono (CO) menor a $10000 \mu g/m^3$ en 8 horas y menor a $30000 \mu g/m^3$ en 1 hora.
- Concentración de dióxido de nitrógeno (NO_2) menor a $40 \mu g/m^3$ anuales y menor a $200 \mu g/m^3$ en una hora
- Concentración máxima de benceno de $5 \mu g/m^3$ anuales.

Cabe resaltarse que para el desarrollo de las especificaciones de diseño de las categorías de desempeño y seguridad se llegó a un convenio con los usuarios del mismo⁵; pero en lo referente a costos, adicionalmente se tomó en consideración otra visita técnica realizada a un taller de construcción y mantenimiento de cámaras de tratamiento térmico de pallets⁶.

Y en lo que respecta a las especificaciones ambientales, se basó el diseño en el Acuerdo Ministerial No. 50 NCA del Ministerio de Ambiente de la República del Ecuador⁷.

⁵ Esto se realizó durante la visita técnica a Ecuapallets [4]

⁶ Referencia [7]

⁷ Referencia [8]

Tabla 2.7 Matriz Objetivos-Métricas para nuestro diseño

Objetivos	Dim: 7.5x4x3 m	Cap: 250 pallets	T=56°C; 30 min	Duración < 3 horas	Mediciones: 3 minutos	Termocuplas tipo K	Dos puntos de medición	Humedad menor al 25%	Sin supervisión	No ignición	4 pasos de operación	Se detiene en 3 segundos	Ruido menor a 85 dB	< 1 h de limpieza semanal	Superficies Pintadas	\$130 por ciclo	\$800 mantenimiento anual	Costo máximo de \$10500	Sistema contra incendios	Concentración de PM10	Concentración de PM2.5	Concentración de SO ₂	Concentración de CO	Concentración de NO ₂	Concentración de Benceno
Capacidad requerida	♦																								
Temperatura, humedad y tiempo		♦	♦	♦	♦	♦	♦																		
No genere excesiva contaminación																									
Bajo esfuerzo de operación									♦		♦									♦	♦	♦	♦	♦	♦
Fácil de limpiar														♦											
Para fácil e inmediatamente												♦													
Que no sufra de incendios										♦									♦						
Resistente a la corrosión															♦										
No muy grande, de buena apariencia	♦														♦										
Bajo Ruido													♦												
Bajo costo de operación																♦									
Bajo costo de manufactura																		♦							
Bajo costo de mantenimiento																	♦								

Elaboración Propia

2.5 Estructura Funcional

El proceso de sanitizado de los pallets de madera implica varias sub-funciones requeridas para la cámara de tratamiento térmico, entre ellas tenemos el almacenamiento de los pallets de madera, su calentamiento, ventilación, evitar las pérdidas térmicas, medición de temperatura y extracción de humedad. A continuación, se presenta una ilustración de estas sub-funciones en la figura 2.3:

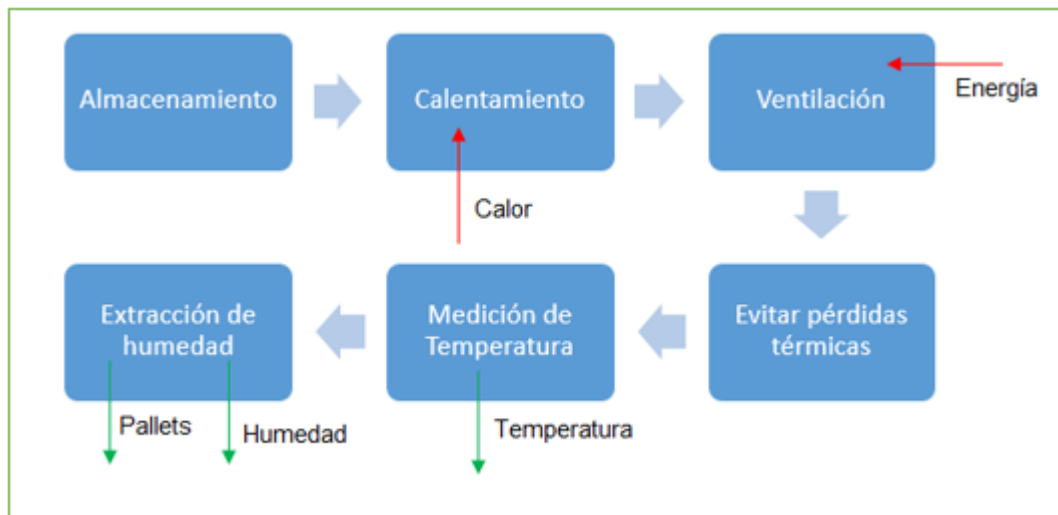


Figura 2.3 Caja transparente para nuestro diseño

Elaboración Propia

Luego de haber identificado las diferentes sub-funciones del diseño, se presentan varias alternativas de solución en cada una de ellas:

Almacenamiento: En este caso el requerimiento será satisfecho simplemente con la infraestructura de la cámara, pero ésta va ligada al material aislante que se utilizará para evitar las pérdidas térmicas. Por lo tanto, los detalles de la infraestructura se definirán posteriormente, en las alternativas de solución para aislamiento térmico.

Calentamiento: Para esta sub-función se explorarían dos puntos de decisión, el primero de ellos es el combustible por utilizarse mientras que el segundo sería el tipo de intercambiador de calor. En lo que respecta al combustible, se tiene como

alternativa utilizar gas licuado de petróleo (GLP), diésel o búnker; mientras que para el intercambiador de calor se podría considerar configuraciones de flujo cruzado puesto que ellos son recomendados para trabajar con gases (Janna, 2015).

Ventilación: Para esta sub-función se considerará el uso de ventiladores de flujo axial, radial e incluso extractores de aire; pero queda por definirse la ubicación de los mismos.

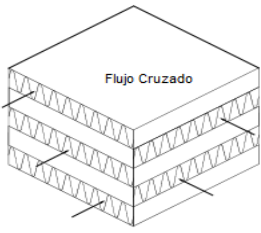
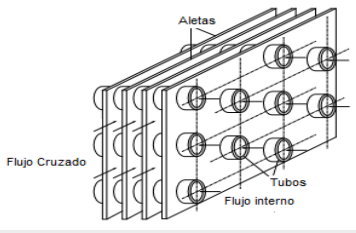
Pérdidas térmicas: En este punto se exploran los diferentes aislantes térmicos que podrían utilizarse para evitar las pérdidas térmicas, se consideraron el poliuretano, lana de vidrio y poliestireno extruido.

Medición de Temperatura: En lo que respecta a la medición de temperatura, las regulaciones por parte de agrocalidad [3] establecen que se deben utilizar termocuplas tipo K, y deben realizarse en por lo menos tres puntos del interior de la cámara, en el corazón de la madera.

Extracción de humedad: Para cumplir este requerimiento, se consideraron dos alternativas: un sistema abierto en el cual entra el aire caliente seco a nuestra cámara y sale aire húmedo a menor temperatura; en cambio, la otra opción consiste en un sistema cerrado en el cual el aire caliente luego de absorber humedad se llevado a una zona de enfriamiento para condensarle la humedad y poder utilizar el mismo aire de nuevo.

A continuación, se muestran nuestras alternativas de diseño en la tabla 2.8, donde se ubican entre las principales opciones los tipos de intercambiadores de calor en las figuras 2.4 y 2.5:

Tabla 2.8 Carta morfológica.

	Opción 1	Opción 2	Opción 3
Combustible	GLP	Diésel	Búnker
Intercambiador de calor	 <p>Figura 2.4 Intercambiador de calor compacto de flujo cruzado [9]</p>	 <p>Figura 2.5 Intercambiador de calor de tubos con aletas [9]</p>	
Ventilación	Ventilador Axial	Ventilador radial	Extractor
Pérdidas térmicas	Poliuretano	Lana de vidrio	Poliestireno Extruido
Extracción de Humedad	Sistema abierto	Sistema cerrado	

Elaboración Propia

2.6 Selección de conceptos

A continuación, se debe comparar cada una de las alternativas consideradas para elegir la mejor de ellas. Esto se realiza mediante matrices de decisión utilizando una escala del 1 al 10 para evaluar qué tanto cumplen con los objetivos de diseño planteados en sus cuatro categorías descritas anteriormente, y considerando también el peso jerarquizado de cada una de ellas. Por lo tanto, se presentan las correspondientes matrices en las tablas 2.9, 2.10, 2.11, 2.12:

Tabla 2.9 Matriz de decisión del combustible.

CRITERIOS	PESO	ALTERNATIVAS					
		GLP		DIESEL		BUNKER	
		Escala	Calificación Pesada	Escala	Calificación Pesada	Escala	Calificación Pesada
Desempeño	41	8	328	7	287	5	205
Seguridad	34	8	272	9	306	7	238
Bajo Costo	21	5	105	7	147	8	168
Apariencia	5	9	45	7	35	6	30
TOTAL		750		775		641	
RANK		2		1		3	

Elaboración Propia

En lo referente a los objetivos de desempeño se tiene que el gas licuado de petróleo posee un desempeño un poco mayor al diésel y mucho mejor que el búnker, puesto que posee la mayor potencia calorífica⁸, además del hecho de que el búnker muchas veces requiere calentamiento para poder ser bombeado debido a su alta viscosidad. De la misma manera se resalta que el GLP también es el combustible menos contaminante de los tres, luego está el diésel y finalmente el búnker puesto que ellos pueden generar hollín y otros productos de combustión (Cengel, 2015).

De la misma manera, respecto a la seguridad se comparan los tres combustibles y se advierte que el GLP al ser un gas se considera menos seguro debido al riesgo de fuga. Continuando con los costos, se tiene que el combustible menos costoso es el búnker, pero éste también requiere un tratamiento de calentamiento previo para disminuir su viscosidad; y finalmente el gas al ser el más limpio conllevaría menor corrosión, a diferencia del búnker y diésel que poseen productos de combustión altamente corrosivos (Cengel, 2015).

Por lo tanto, luego de realizar la respectiva matriz de decisión se selecciona el diésel como combustible.

⁸ A partir de la Tabla A-27 de la referencia [10]

Tabla 2.10 Matriz de decisión del intercambiador de calor.

CRITERIOS	PESO	ALTERNATIVAS			
		COMPACTO		DE TUBOS	
		Escala	Calificación Pesada	Escala	Calificación Pesada
Desempeño	41	9	369	8	328
Seguridad	34	8	272	8	272
Bajo Costo	21	6	126	8	168
Apariencia	5	6	30	8	40
TOTAL		797		808	
RANK		2		1	

Elaboración Propia

En lo referente a desempeño, ambas opciones son similares, ofreciendo una gran área de transferencia de calor, las mayores diferencias se tendrían al momento de la manufactura, el mantenimiento y la limpieza; siendo el intercambiador de tubos superior en estos aspectos, por lo tanto, se lo seleccionó.

Tabla 2.11 Matriz de decisión del aislante.

CRITERIOS	PESO	ALTERNATIVAS					
		POLIURETANO		LANA DE VIDRIO		POLIESTIRENO EXTRUIDO	
		Escala	Calificación Pesada	Escala	Calificación Pesada	Escala	Calificación Pesada
Desempeño	41	9	369	6	246	8	328
Seguridad	34	8	272	7	238	8	272
Bajo Costo	21	3	63	9	189	4	84
Apariencia	5	8	40	7	35	8	40
TOTAL		744		708		724	
RANK		1		3		2	

Elaboración Propia

El desempeño de los aislantes térmicos se basa en su resistencia térmica, así como en la resistencia mecánica que pueda ofrecernos. En base a esto, el aislante de

mejor desempeño sería el poliuretano debido a su alta resistencia térmica, baja conductividad, y buena resistencia mecánica ya que se utiliza en presentaciones de panel; de la misma manera, los paneles de poliestireno extruido poseen una buena resistencia mecánica y una buena resistencia térmica pero con un desempeño ligeramente menor al poliuretano; en cambio, la lana de vidrio al ser un material fibroso requiere de algún elemento estructural y cubierta para lograr una resistencia mecánica adecuada y posee la menor resistencia térmica también. De la misma forma los materiales fibrosos son menos resistentes a los incendios puesto que al atrapar aire entre las fibras, se favorece la propagación del fuego.

Y finalmente en lo referente a costos, el más barato de los aislantes considerados es la lana de vidrio, seguido por el poliestireno extruido y finalmente el poliuretano (EnergyPlus, 2010). Tomando en consideración todo esto, el aislante seleccionado será el poliuretano.

Tabla 2.12 Matriz de decisión del sistema de extracción de humedad.

CRITERIOS	PESO	ALTERNATIVAS			
		ABIERTO		CERRADO	
		Escala	Calificación Pesada	Escala	Calificación Pesada
Desempeño	41	8	328	9	369
Seguridad	34	8	272	8	272
Bajo Costo	21	9	189	6	126
Apariencia	5	9	45	7	35
TOTAL		834		802	
RANK		1		2	

Elaboración Propia

Para esta sub-función tenemos dos tipos de sistemas, el abierto y el cerrado, los cuales poseen un desempeño comparable a excepción de su eficiencia energética, puesto que en el sistema cerrado se trata de recuperar cierta parte de la energía utilizada al volver a usar el mismo aire la cual se pierde al ser expulsada en el sistema abierto. Pero, por otro lado, así mismo es mucho más costoso el sistema

cerrado y a la vez más complejo lo cual también podría comprometer el mantenimiento y la instalación (Nyle Systems, 2017). Por lo tanto, el sistema seleccionado es el abierto.

2.7 Cálculos: Carga Térmica, Pérdidas Térmicas, Intercambiador de calor

Luego de haber seleccionado la mejor alternativa de solución, se procede a realizar los respectivos cálculos para el dimensionamiento de los componentes de nuestro sistema. En primer lugar, se requiere determinar la carga térmica; es decir, la cantidad de calor que se necesita suministrar a nuestra cámara para que cumpla los requerimientos de desempeño.

Para ello se considera la siguiente curva de calentamiento para la madera: ésta ingresa a una temperatura ambiente de 25°C, se la calienta hasta alcanzar 56°C en cierto tiempo, se mantiene esa temperatura durante media hora y finalmente el enfriamiento hasta temperatura ambiente que por simetría se muestra con la misma tasa, pero si tomara más tiempo no habría problema; esto se muestra en la figura 2.6:

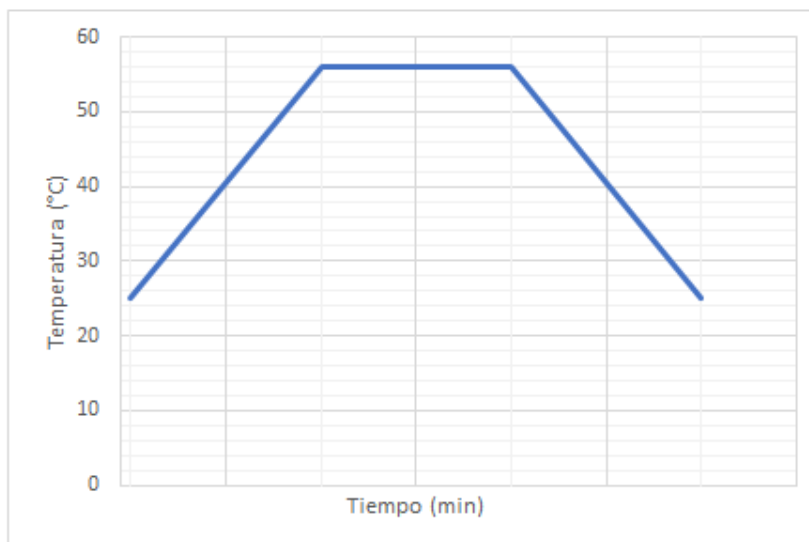


Figura 2.6 Curva de calentamiento de la madera

Elaboración Propia

Para poder determinar el tiempo que tomará la etapa de calentamiento, se advierte un problema de conducción transiente para los pallets, en el cual se tiene que

mientras más alta sea la temperatura del aire en el interior de la cámara, menos tardaremos en llegar a la temperatura deseada en el interior de la madera, cuyo caso crítico sería en el interior de los bloques de apoyo del pallet debido a su gran espesor.

2.7.1 Temperatura del Aire

Para la obtención de la temperatura del aire apropiada, se consideró la ubicación menos favorecida dentro de la cámara, lo cual se traduce en asumir convección natural en lugar de forzada razón para asignar al coeficiente convectivo un valor de $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Incropera, 2013). El modelo utilizado se muestra en la figura 2.7:

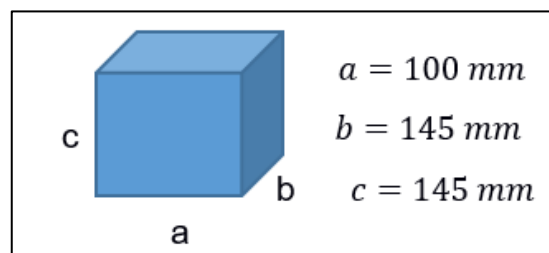


Figura 2.7 Modelo tridimensional para conducción transiente

Elaboración Propia

Se empieza determinando si es posible o no despreciar cualquier gradiente de temperatura dentro del sólido, así que se calcula el número de Biot y se comprueba si es mayor que 0.1

$$Bi = \frac{h * L_c}{k}$$

$$L_c = \frac{V}{A_s}$$

$$L_c = 0.10005 \text{ m}$$

$$Bi = 20.844$$

$$Bi \gg 0.1$$

Al no cumplirse la condición, se deben considerar los efectos espaciales y los gradientes de temperatura dentro del sólido. Y al tratarse de un problema tridimensional, se divide en tres problemas unidimensionales de pared plana, tal como se muestra en la figura 2.8:

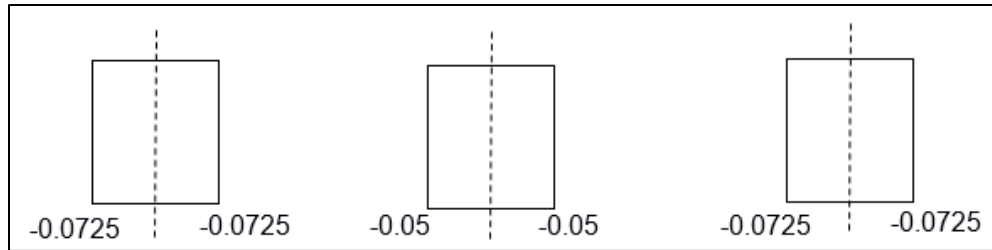


Figura 2.8 Descomposición del modelo tridimensional

Fuente: Elaboración Propia

$$T(x, y, z) = f(T(x, t), T(y, t), T(z, t))$$

Solución 1.

Se procede entonces a resolver con un enfoque adimensional cada una de las partes de nuestro problema, hallamos el número de Biot y el de Fourier para posteriormente obtener la temperatura adimensional en la mitad de la pared:

$$Bi = \frac{hL}{k} = 15.10$$

$$Fo = \frac{\alpha * t}{L^2}$$

Donde

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} = 1.705 \times 10^{-7} \frac{m^2}{s}$$

$$Fo = 0.1168$$

$$\theta^* = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \exp(-\rho_n^2 Fo) \cos(\rho_n X^*)$$

$$X^* = \frac{X}{L} = 0$$

$$C_n = \frac{4 \sin(\rho_n)}{2\rho_n + \sin(2\rho_n)}$$

Donde

$$\rho_n \tan(\rho_n) = Bi$$

Del Apéndice B3 en la referencia [2] obtenemos los primeros 4 valores de ρ_n , con los cuales se obtienen las constantes C_n , y con ellos se halla la temperatura adimensional en la mitad de la pared:

$$\theta_{(0,3600)}^* = C_1 \exp(-\rho_1^2 Fo) + C_2 \exp(-\rho_2^2 Fo) + C_3 \exp(-\rho_3^2 Fo) + C_4 \exp(-\rho_4^2 Fo)$$

$$\theta_{(0,3600)}^* = 0.9428$$

Solución 2.

Se repite el procedimiento anterior con el respectivo espesor de pared para obtener:

$$Bi = 10.42$$

$$Fo = 0.245$$

$$\theta_{(0,3600)}^* = 0.7587$$

Luego el resultado del problema tridimensional será el producto de los tres problemas unidimensionales

$$\theta^*(x, y, z, t) = \theta^*(x, t) \theta^*(y, t) \theta^*(z, t)$$

$$\theta^*(x, y, z, t) = 0.6743$$

Para finalmente hallar la temperatura del aire:

$$\frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} = 0.6743$$

$$56 - T_\infty = (25 - T_\infty)(0.6743)$$

$$T_\infty = 120,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Este procedimiento se podría repetir para conocer qué temperatura debería tener el aire para alcanzar la temperatura interna en la madera en el tiempo deseado, obteniéndose el gráfico de la figura 2.9; a partir del cual se estableció un compromiso entre la temperatura del aire que debía alcanzarse y el tiempo que tomaría la etapa de calentamiento, concluyéndose que efectivamente se trabajará

con una temperatura para el aire de $T_{\infty} = 120^{\circ}\text{C}$ y con la cual se demoraría aproximadamente una hora en alcanzar 56°C en el interior de la madera.

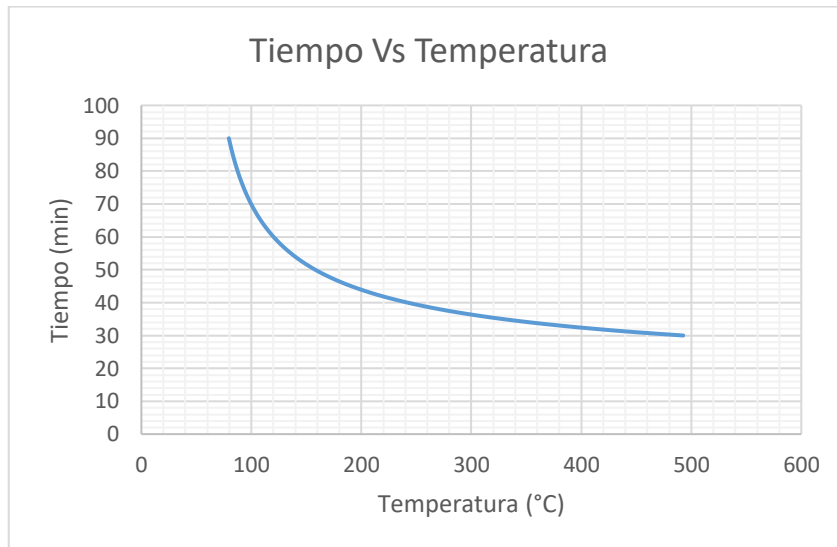


Figura 2.9 Efecto de la temperatura del aire en el tiempo de calentamiento

Elaboración Propia

En este punto, se advierte que la temperatura seleccionada para el aire sobrepasa la temperatura máxima de operación para el aislante seleccionado anteriormente (Incropera, 2013), tanto el poliuretano como el poliestireno extruido; por lo tanto, ahora se trabajará con lana de vidrio como aislante. Adicionalmente, se advierte que, para evitar altas temperaturas superficiales de la madera, se decidió instalar un ducto de aire a través del cual se distribuye de mejor manera el fluido caliente; de acuerdo con la normativa aplicable en ductos de aire acondicionado (CLIMAVÉR, 1995) se establecieron dimensiones de 250x250 mm para la sección transversal.

2.7.2 Pérdidas Térmicas

Para el cálculo de las pérdidas de calor tenemos dos casos, en primer lugar, hay que considerar la composición de las paredes y su respectivo circuito térmico, que se muestra en la figura 2.10:

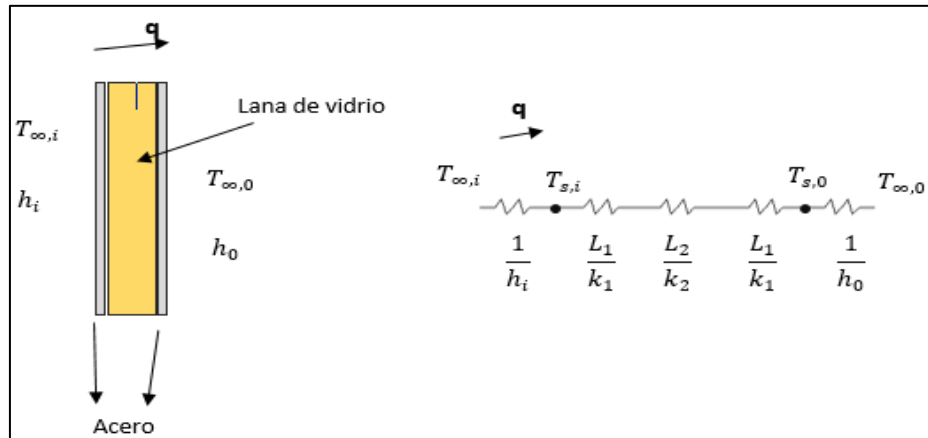


Figura 2.10 Esquema de la composición de las paredes y su circuito térmico

Elaboración Propia

Para determinar el flujo de calor a través de la pared mostrada, se requiere conocer los coeficientes convectivos tanto en la superficie interior como exterior de la pared, pero estos no se pueden evaluar directamente puesto que no se conoce tampoco las temperaturas superficiales ni la velocidad del aire en el interior de la cámara; por lo tanto se optó por una metodología iterativa en la cual se asumen valores para los coeficientes convectivos, se determina el flujo de calor, las temperaturas superficiales y con ellas los coeficientes convectivos nuevamente para comprobar la hipótesis inicial; el proceso se repetiría hasta llegar a la convergencia.

Para la asunción inicial, se consideró el peor de los casos, el cual sería los mayores coeficientes convectivos posibles para convección con gases, forzada en el interior y libre en el exterior, éstos serían (Incropera, 2013):

$$h_0 = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$h_i = 250 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Además, de acuerdo con la configuración de pared y los materiales seleccionados, se tendría:

$$L_1 = 1 \text{ mm}$$

$$k_1 = 60.5 \text{ W/mK}$$

$$k_2 = 0.056 \text{ W/mK}$$

$$L_2 = 40 \text{ mm}$$

$$T_{\infty,i} = 120 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{\infty,0} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

De esta manera se podría hallar la resistencia térmica total de todo el circuito:

$$R_T = \frac{1}{h_i} + \frac{2L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2} + \frac{1}{h_0}$$

Luego el flujo de calor:

$$q'' = \frac{T_{\infty,i} - T_{\infty,0}}{R_T}$$

Para así poder determinar la temperatura superficial exterior:

$$T_{s,0} = T_{\infty,i} - q'' \left(\frac{1}{h_i} + \frac{2L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2} \right)$$

Cabe resaltarse que interesa el coeficiente convectivo de la superficie exterior puesto que, al comparar las resistencias térmicas, ésta es la única semejante a la de conducción a través del aislante que es la mayor de todas.

Una vez determinada la temperatura superficial exterior se procede a calcular el coeficiente convectivo en esa ubicación, para ello se evalúa la temperatura de película y el coeficiente de expansión térmica, asumiendo que el aire es un gas ideal:

$$T_f = \frac{T_s + T_{\infty}}{2}$$

$$\beta = \frac{1}{T_f}$$

Se utilizó la tabla A4 de la referencia [2] para obtener las propiedades del aire a la temperatura fílmica:

$$Pr = 0.707$$

$$k = 26.3 \times 10^{-3} \text{ W/mK}$$

$$\alpha = 22.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\gamma = 15.89 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Luego el número de Rayleigh, determinando también que el flujo es turbulento:

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\alpha\gamma}, Ra_{cr} \approx 10^9$$

Sabiendo el régimen de flujo se pudo seleccionar la correlación correcta para determinar el número de Nusselt promedio en la pared y finalmente el coeficiente convectivo:

$$\overline{Nu}_L = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0.492}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right)^{\frac{8}{27}}} \right\}^2$$

$$Nu = \frac{hL}{k}$$

En el caso del techo la correlación fue diferente debido a que se encuentra en posición horizontal:

$$Nu_L = 0.15 Ra_L^{\frac{1}{3}}$$

Se repitió este proceso hasta que converja el valor asumido inicial con el calculado, obteniéndose los siguientes resultados:

$$h_o = 4 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$q''_{pared} = 104.83 \text{ W/m}^2$$

En cambio, para hallar las pérdidas a través del suelo se utilizó un modelo diferente, el de sólido semi-infinito con convección en su superficie exterior que se

puede observar en la figura 2.11; pero también se tomó en cuenta la norma ISO 13370 [12].

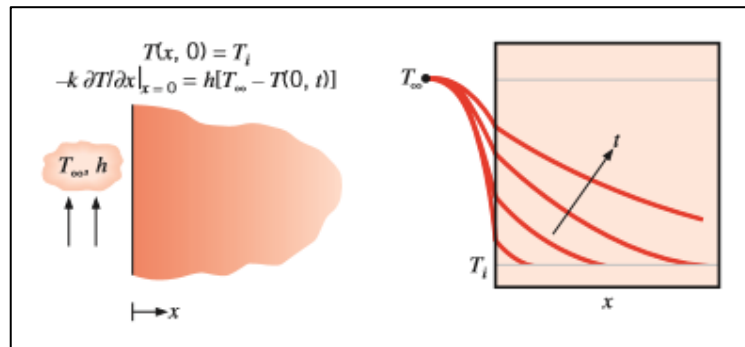


Figura 2.11. Modelo de sólido semi-infinito

Fuente: Incropera, 2013

Por lo tanto, su temperatura seguiría la siguiente distribución transiente:

$$\frac{T(x,t) - T_i}{T_\infty - T_i} = \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) - \left[\exp\left(\frac{hx}{k} + \frac{h^2 \alpha t}{k^2}\right)\right] \left[\operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} + \frac{h\sqrt{\alpha t}}{k}\right)\right]$$

Y el flujo de calor transferido en función del tiempo sería:

$$q''(t) = h[T_\infty - T_s(t)]$$

Mientras que para hallar su valor promedio tendríamos:

$$\bar{q}'' = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_1}^{t_2} q dt$$

Se exploraron dos alternativas para el suelo: concreto y madera, y utilizando las ecuaciones anteriores para sólido semi-infinito se graficó el flujo de calor transferido en función del tiempo, se lo muestra en la figura 2.12:

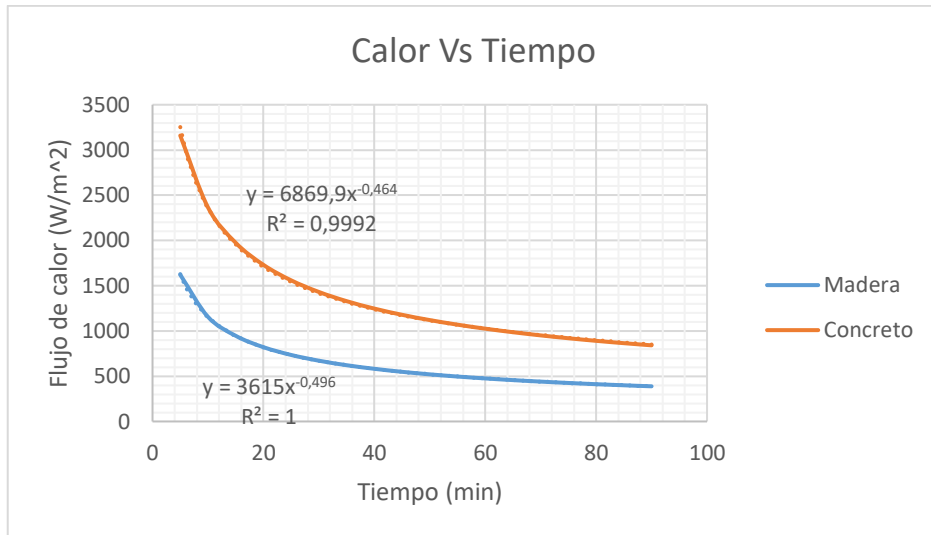


Figura 2.12 Gráfica del calor transferido al suelo en función del tiempo

Elaboración Propia

En base a la figura 2.12 se puede observar claramente que es más conveniente colocar al menos una capa de aislamiento en el piso, que en este caso sería de madera, ya que al tener una menor difusividad térmica se va a transferir menos calor que con concreto. Y el valor promedio de este flujo de calor es:

$$q''_{suelo} = 625.17 \text{ W/m}^2$$

Luego para determinar el espesor del suelo de madera que se utilizaría, se basó en que debería ser aquel a final del cual ya no se evidencien los efectos de la transferencia de calor en su temperatura al cabo del tiempo requerido; es decir, la posición en la que su temperatura adimensional sea 0.9 luego de los 90 minutos del proceso de calentamiento. Para ello utilizamos la figura 2.13:

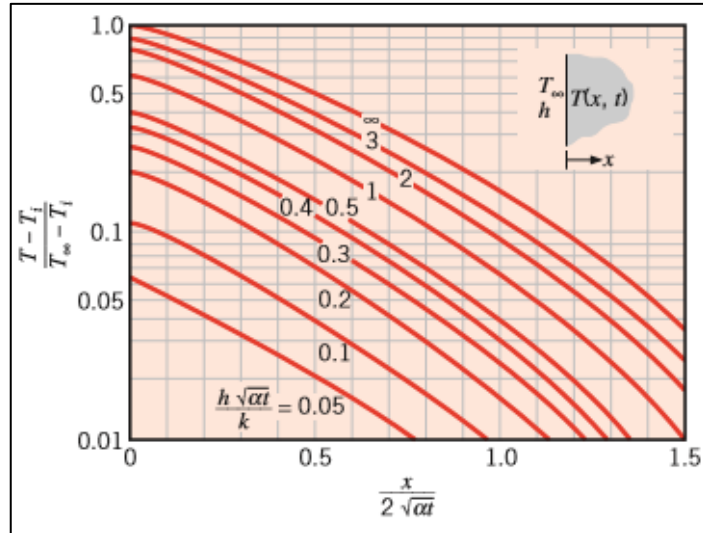


Figura 2.13 Historial de temperaturas en un sólido semi-infinito con convección

Fuente: Incropera, 2013

Entonces:

$$\frac{h\sqrt{\alpha t}}{k} = 25.3$$

$$\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \approx 0.1$$

$$x = 160.07 \text{ mm}$$

Se resalta que las pérdidas a través del suelo son mayores que aquellas de las paredes, y finalmente el valor para las pérdidas totales de calor sería:

$$q_{perdidas} = q''_{pared} A_{pared} + q''_{suelo} A_{suelo}$$

$$q_{perdidas} = 29.13 \text{ Kw}$$

2.7.3 Carga Térmica

Esta sería la cantidad de calor sensible que debe suministrarse a la madera para elevar su temperatura hasta 56°C, junto con el calor latente necesario para evaporar la humedad deseada; por lo tanto, tendríamos:

$$q_{madera} = \frac{mc\Delta T}{t_1}$$

$$q_{madera} = 35.65 \text{ Kw}$$

$$q_{agua} = \frac{m(\Delta humedad)h_{fg}}{t_2}$$

$$q_{agua} = 197.28 \text{ Kw}$$

Donde:

$$t_1 = 60 \text{ minutos}$$

$$t_2 = 90 \text{ minutos}$$

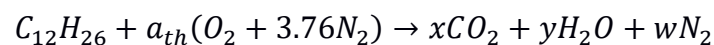
Se aclara que la masa de agua evaporada se la halló estableciendo un cambio de humedad relativa en la madera desde 35% hasta 20%, y además que para el tiempo de esta disminución se consideró 90 minutos.

En total, considerando las pérdidas a de calor a través de las paredes y el suelo tendríamos:

$$q_{Total} = 262.06 \text{ Kw}$$

2.7.4 Temperatura de flama adiabática

Se considera la combustión del diésel como si este fuera dodecano (Cengel, 2015) y se balancea la ecuación de combustión completa:

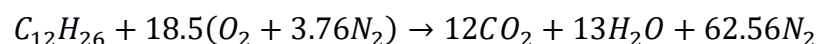


$$C: 12 = x$$

$$H: 26 = 2y \rightarrow y = 13$$

$$O: 2 a_{th} = 2x + y \rightarrow a_{th} = \frac{24 + 13}{2} = 18.5$$

$$N: w = 18.5(3.76) = 62.56$$



El esquema de la cámara de combustión se presenta a continuación en la figura 2.14:

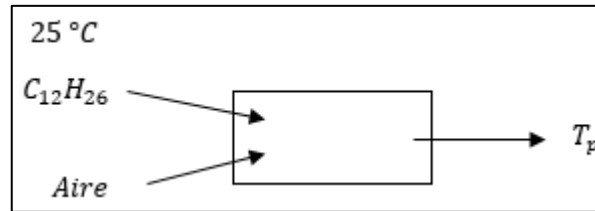
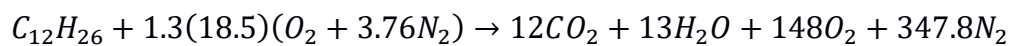


Figura 2.14 Esquema de la cámara de combustión

Fuente: Elaboración Propia

Luego se consideró un exceso de aire del 30% (Cengel, 2015):



$$H_{prod} = H_{react}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \sum N_p (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}^0)_p &= \sum N_r (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}^0)_r \\ \Rightarrow (12)(-393520 + \bar{h}_{CO_2} - 9364) &: CO_2 \\ + (13)(-241820 + \bar{h}_{H_2O} - 9904) &: H_2O \\ + 148(0 + \bar{h}_{O_2} - 8682) &: O_2 \\ + 347.8(0 + \bar{h}_{N_2} - 8669) &: N_2 \\ = (1)(291010) &: C_{12}H_{26} \end{aligned}$$

Entonces:

$$12 \bar{h}_{CO_2} + 13 \bar{h}_{H_2O} + 148 \bar{h}_{O_2} + 347.8 \bar{h}_{N_2} = 12116024.2$$

Prueba y error:

$$T_p = 2024 K = 1750^\circ C$$

Cabe resaltarse que esta temperatura es la de la llama en el quemador, pero decae rápidamente debido a la transferencia de calor por radiación; entonces se asumirá una temperatura aproximada de los gases de combustión de 600°C (Kays and London, 1998)

En este punto también se calcula la relación de masa entre los gases de combustión y el diésel en base a la ecuación química balanceada con un exceso de aire del 30%, la cual es la siguiente:

$$\frac{\dot{m}_{gases}}{\dot{m}_{diesel}} = 89.63$$

2.7.5 Flujo másico de aire

Para determinarlo se realizó un balance de energía tomando como volumen de control la cámara entera, tal como se observa en la figura 2.15; por lo tanto, en estado estable el balance establecería lo siguiente:

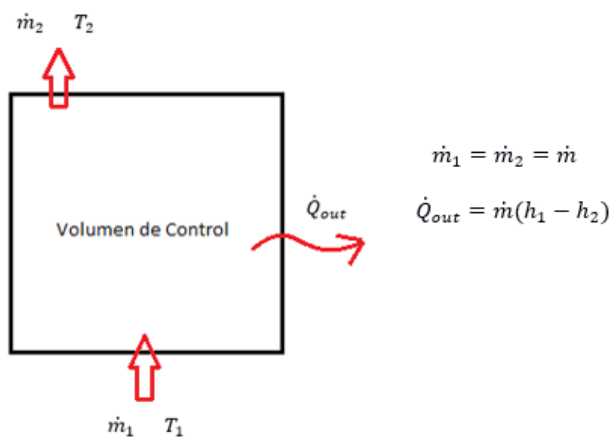


Figura 2.15 Esquema de la cámara como volumen de control

Elaboración Propia

En este proceso el aire que ingresa a la cámara se enfría y aumenta su humedad absoluta, por lo tanto, se lo simplificó con el modelo de la figura 2.16:

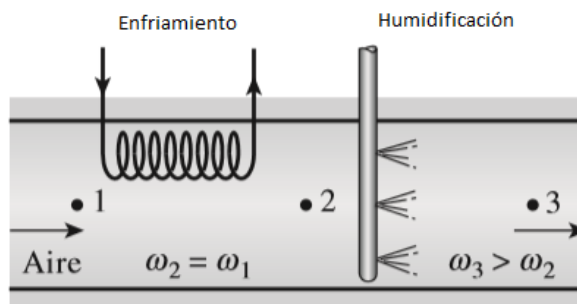


Figura 2.16 Modelo para los procesos de acondicionamiento de aire utilizado

Fuente: Cengel, 2015

No se lo pudo considerar como un enfriamiento evaporativo porque si existe transferencia de calor neta con los alrededores.

Al realizar los balances de masa y energía se tendría lo siguiente:

- Masa de aire:

$$\dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2} = \dot{m}_{a3} = \dot{m}_a$$

- Masa de agua en sección de enfriamiento:

$$\omega_1 = \omega_2$$

- Masa de agua en sección de humidificación:

$$\dot{m}_a \omega_2 + \dot{m}_w = \dot{m}_a \omega_3$$

$$\omega_3 = \frac{\dot{m}_a \omega_2 + \dot{m}_w}{\dot{m}_a}$$

Donde:

$$\dot{m}_w = \frac{m(\Delta \text{humedad})}{t}$$

Entonces, si se conociera el flujo másico de aire se podría determinar su humedad absoluta a la salida, en la cual se asume que se tendrán condiciones cercanas a las de saturación, pero siendo conservativos se establece una humedad relativa a la salida de $\phi_3 = 75\%$. Con estas propiedades se determina la entalpía en el punto 3, que interviene en el balance de energía para la sección de humidificación para hallar la entalpía en el punto 2:

$$\dot{m}_a h_2 + \dot{m}_w h_{g@56^\circ\text{C}} = \dot{m}_a h_3$$

$$h_2 = \frac{\dot{m}_a h_3 - \dot{m}_w h_{g@56^\circ\text{C}}}{\dot{m}_a}$$

Mientras que el balance de energía para la sección de enfriamiento se tiene:

$$\dot{m}_a h_1 = \dot{m}_a h_2 + \dot{Q}_{out}$$

A partir del cual se obtiene el flujo másico de aire requerido:

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{Q}_{out}}{h_1 - h_2}$$

Por lo tanto, el cálculo es iterativo y al suponer un flujo másico de aire para empezar la iteración se debe comprobar si la respuesta final coincide. Fue necesario utilizar una calculadora psicrométrica para determinar las propiedades y finalmente se obtuvo convergencia de cálculo con un flujo másico de:

$$\dot{m}_a = 3.2 \text{ kg/s}$$

El cual implicaría una temperatura de salida de 46°C aproximadamente y estaría de acuerdo con el balance de energía general realizado en la cámara. Este flujo másico de aire será distribuido en el interior de la cámara a través de un sistema de ductos, y así volver más homogéneo el proceso en cuanto a la transferencia de calor y el recorrido del aire en el interior de la cámara; adicionalmente se colocarán tres extractores de aire en el techo de la misma.

2.7.6 Simulación

Para asegurar un mayor nivel de confianza para los resultados obtenidos anteriormente, se realizó una simulación en el software de diseño asistido por computadora: *Solidworks*, en donde se consideró un flujo interno a través de los ductos y posteriormente su distribución de flujo dentro de la cámara hasta salir a través de los extractores en el techo. Las condiciones de frontera para nuestra simulación fueron: un flujo másico de entrada de 3.2 kg/s y velocidades de salida correspondientes en la ubicación de los extractores de aire, así como una presión atmosférica externa y convección libre en la superficie exterior.

A continuación, en la figura 2.17 se observa la geometría utilizada para nuestra simulación:

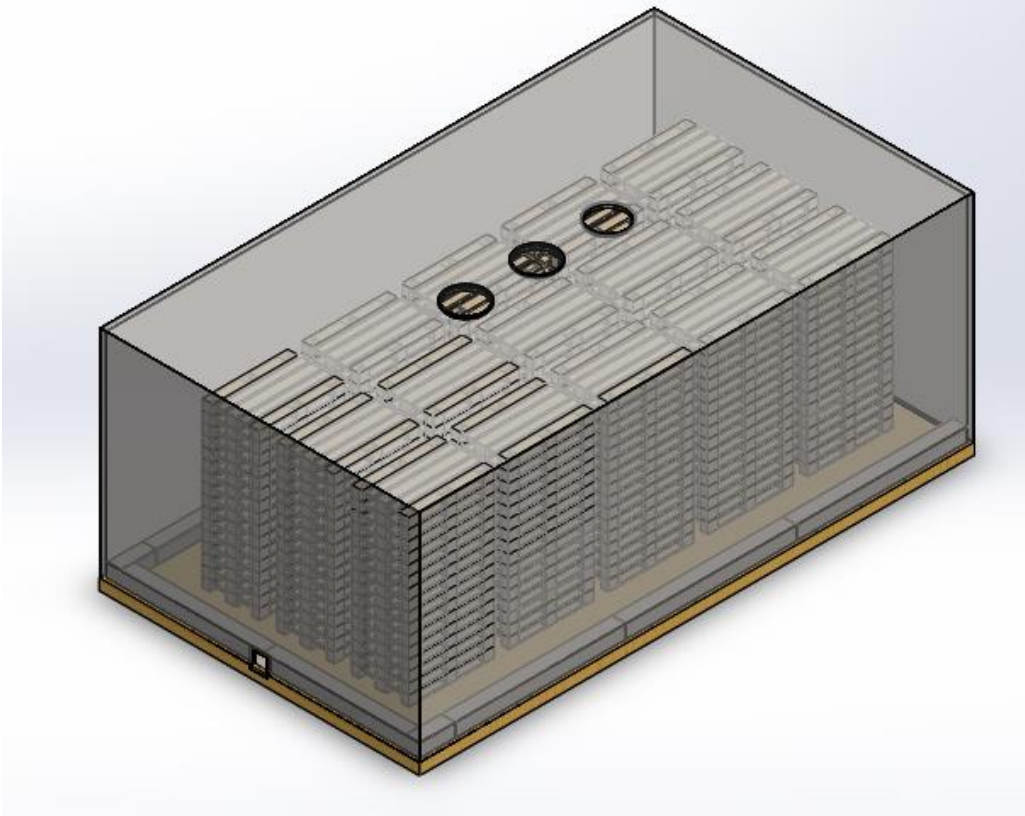


Figura 2.17 Descripción geométrica del diseño

Elaboración Propia

De la misma manera, se puede apreciar mejor la geometría con un corte longitudinal de la cámara, vista que se ilustra a continuación en la figura 2.18:

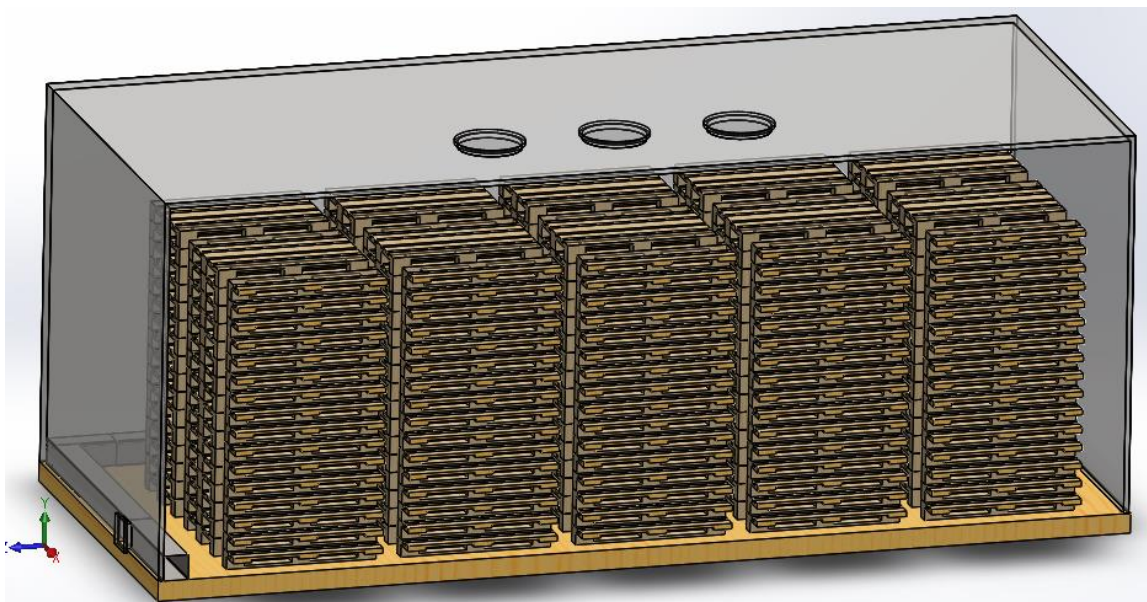


Figura 2.18 Corte longitudinal del diseño

Elaboración Propia

En lo que respecta a los resultados de la simulación, se presentarán en el siguiente capítulo; por ahora solo establecemos nuestras condiciones de frontera.

2.7.7 Intercambiador de Calor

Para nuestro diseño se ha seleccionado un intercambiador de calor compacto de flujo cruzado, a manera de banco de tubos y se contempló la opción de colocarle aletas rectangulares, lo que aumentaría el área de transferencia de calor, mejorando su efectividad y reduciendo su tamaño; específicamente se seleccionó la superficie 7.75-5/8T de la referencia [15]. En la figura 2.19 se observa un esquema de ambos tipos de intercambiador:

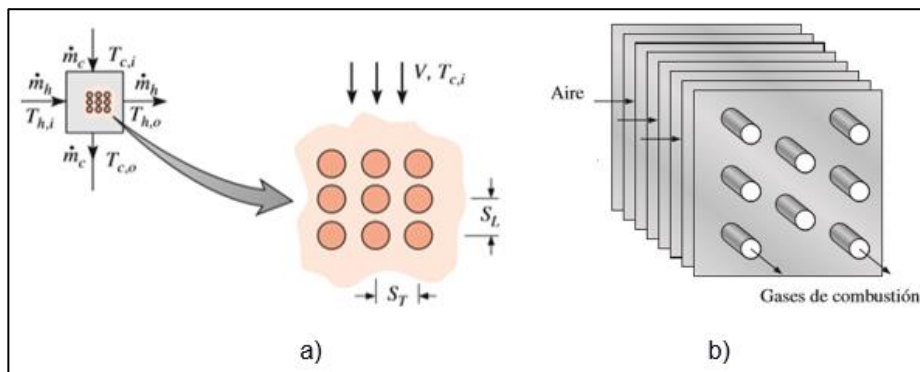


Figura 2.19 Esquema del Intercambiador de calor

Fuente: a) Incropera, 2013; b) Cengel, 2015

En efecto se realizó el dimensionamiento de ambas alternativas, pero el tamaño necesario para nuestro intercambiador fue demasiado exagerado, sobre todo en el caso sin aletas; y si se decidiera utilizar uno de menor volumen no se alcanzarían las temperaturas deseadas a menos que se aumente el consumo de combustible por encima de lo estrictamente requerido. Por lo tanto, fue necesario lograr un equilibrio entre el tamaño del intercambiador y el consumo de combustible; cabe resaltarse que también es de interés la facilidad de manufactura y la caída de presión a través del mismo puesto que ella va relacionada directamente con la potencia consumida para el flujo.

Tal como se esperaba se obtuvo un mejor desempeño y un menor consumo de diésel al utilizar las aletas, pero también implicaría un mayor consumo de potencia para el flujo, además del elevado costo; los cuales se considera que no justifican su instalación. Por lo tanto, se decidió no usarlas.

Para su dimensionamiento se consideran los siguientes parámetros:

$$T_{h,i} = 600^{\circ}\text{C}; \quad c_{p,h} = 1047.26 \text{ J/Kg} \cdot \text{K}$$

$$T_{c,i} = 25^{\circ}\text{C}; \quad \dot{m}_c = 3.2 \text{ kg/s}; \quad c_{p,c} = 1008.98 \text{ J/Kg} \cdot \text{K}$$

Se detalla que para determinar el calor específico de los gases de combustión se los asumió como aire a la temperatura promedio entre la entrada y la salida del intercambiador (Incropera, 2013).

Se utilizó el arreglo escalonado de tubos 7.75-5/8T de la referencia [15], se detallan la geometría a continuación en la figura 2.20:

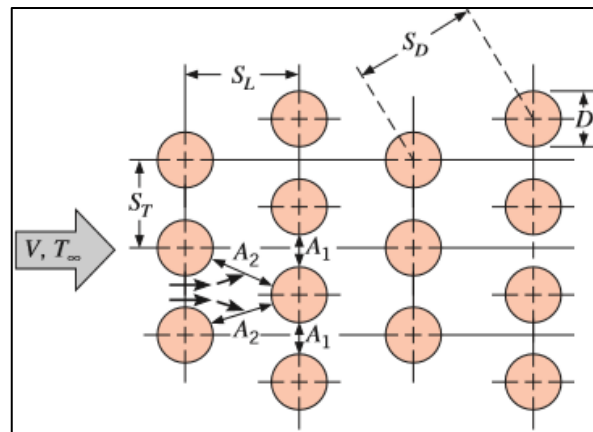


Figura 2.20 Geometría para el arreglo de banco de tubos

Fuente: Elaboración Propia

Donde:

$$S_T = 1.5 \text{ in}$$

$$S_L = 1.75 \text{ in}$$

$$D = 0.676 \text{ in}$$

Luego de analizar varios diseños con el proceso iterativo descrito en los párrafos anteriores, se decidió que las dimensiones más convenientes serían de **0.65x0.65x1 m**; y con ellas se probaron varios consumos de combustible necesario hasta lograr la temperatura de salida deseada para el aire. Entonces, por conservación de la energía:

$$T_{c,o} = T_{c,i} + \frac{q}{\dot{m}_c c_{p,c}}$$

Donde:

$$q = \varepsilon * q_{max}$$

$$q_{max} = C_{min}(T_{h,i} - T_{c,i})$$

Y la efectividad se halla utilizando la figura 2.21:

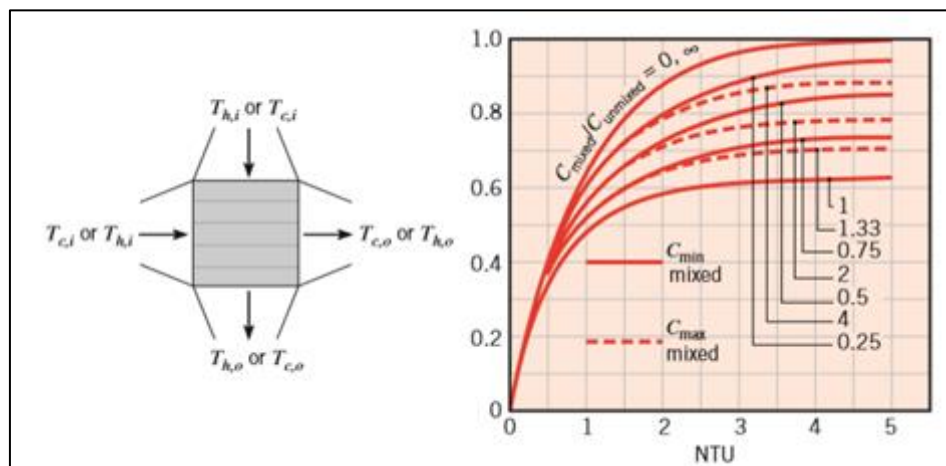


Figura 2.21. Efectividad de intercambiadores de calor de flujo cruzado con un fluido mezclado y otro no mezclado

Fuente: Incropera, 2013

O en su defecto, con la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = \left(\frac{C_{max}}{C_{min}} \right) \left(1 - e^{\left(-\frac{C_{min}}{C_{max}} (1 - e^{-NTU}) \right)} \right)$$

Para lo cual deben conocerse también las capacitancias térmicas de los flujos, en nuestro caso serían:

$$C_{min} = C_h = \dot{m}_h c_{p,h}$$

$$C_{max} = C_c = \dot{m}_c c_{p,c}$$

Y también el número de unidades transferidas:

$$NTU = \frac{UA}{C_{min}}$$

Se utilizó el coeficiente global de transferencia de calor basados en el área de contacto con el fluido caliente, por lo tanto:

$$\frac{1}{U_h A_h} = \frac{1}{h_h A_h} + \frac{R''_f}{A_h} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_c A_c}$$

$$\frac{1}{U_h} = \frac{1}{h_h} + R''_f + \frac{1}{h_c (A_c/A_h)}$$

Se asumió un factor de Fouling interno $R''_f = 0.009 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ (Incropera, 2013) y se despreció la resistencia térmica de conducción a través de la tubería.

Entonces, se lograron resultados satisfactorios con un consumo de combustible $\dot{m}_h = 1.9 \text{ kg/s}$. Se tiene:

$$C_h = \dot{m}_h c_{p,h} = 1.99 \text{ kJ/K} \quad C_c = \dot{m}_c c_{p,c} = 3.23 \text{ kJ/K}$$

Con una relación de capacitancias igual a:

$$\frac{C_{mixed}}{C_{unmixed}} = \frac{C_c}{C_h} = 0.62$$

Donde:

$$C_{max} = C_{mixed}$$

En cambio, para determinar el NTU se requiere el coeficiente global de transferencia de calor U , que al mismo tiempo se basa en los coeficientes convectivos en la superficie interior y exterior de los tubos. Para los cuales se tiene lo siguiente:

- Coeficiente convectivo interior:

$$N = \frac{A}{\pi DL} = 383 \text{ tubos}$$

$$Re_D = \frac{4\dot{m}_h}{N\pi D_i \mu} = 12774$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \log \left[\frac{69}{Re} + \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} \right)^{1.11} \right]$$

$$Nu_D = \frac{(f/8)(Re_D - 1000)Pr}{1 + 12.7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)} = 35.5$$

$$h_h = \frac{Nu_D k}{D_i} = 91.03 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$A_h = N\pi D_i c = 13.06 \text{ m}^2$$

- Coeficiente convectivo exterior:

$$V = \frac{\dot{m}_c}{\rho a^2} = 7,61 \text{ m/s}$$

$$V_{max} = V[S_T(S_T - D)] = 13.86 \text{ m/s}$$

$$Re_{max} = \frac{V_{max} D}{\nu} = 11373$$

$$Nu_D = 0.34(0.99)Re_D^{0.6}Pr^{0.36} \left(\frac{Pr}{Pr_s} \right)^{1/4} = 80.64$$

$$h_c = \frac{Nu_D k}{D} = 140.9 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$A_c = N\pi Dc = 13.46 \text{ m}^2$$

Entonces:

$$U_h = 53.27 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$NTU = \frac{U_h A_h}{C_{min}} = 0.35$$

$$\varepsilon = 0.27$$

$$q = \varepsilon C_{min}(T_{h,i} - T_{c,i}) = 308.65 \text{ W}$$

$$T_{c,o} = T_{c,i} + \frac{q}{\dot{m}_c c_{p,c}} = \mathbf{120.6^\circ\text{C}}$$

Ahora, conociendo la relación de masa entre el combustible y los gases de combustión se puede hallar el flujo másico de diésel:

$$\dot{m}_{diesel} = 21.2 \text{ g/s}$$

Y con la densidad del combustible ($\rho = 840 \text{ kg/m}^3$) se halla su flujo volumétrico:

$$\dot{V} = \mathbf{24 \text{ gal/h}}$$

De la misma manera tenemos la caída de presión:

$$\Delta P = N_L \chi \left(\frac{\rho V_{max}^2}{2} \right) f = 661.7 \text{ Pa}$$

Para la cual se debió utilizar la figura 2.22:

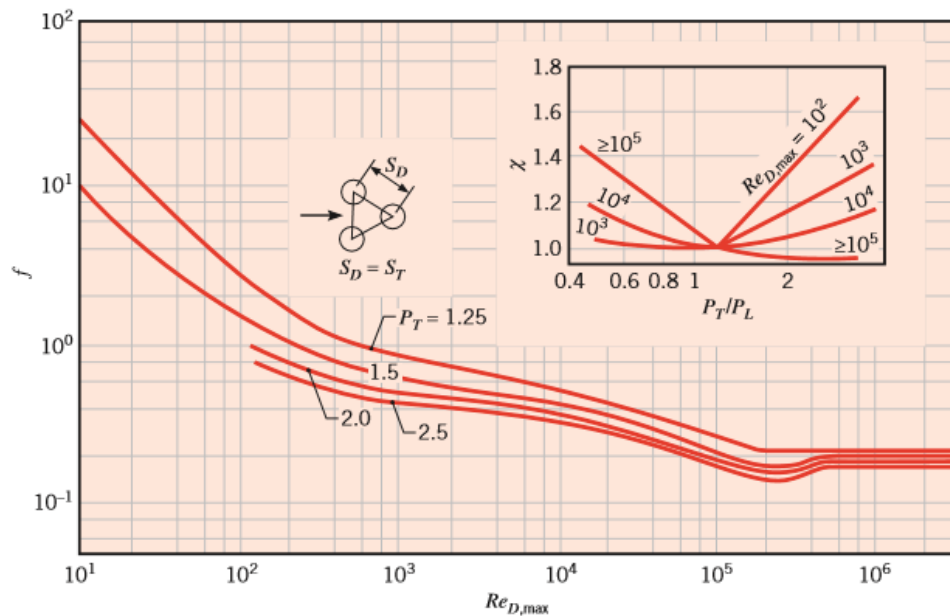


Figura 2.22 Relación de número de Reynolds y el factor de fricción de tuberías.

Fuente: Incropera, 2013

Donde:

$$P_T = \frac{S_T}{D}$$

$$P_L = \frac{S_L}{D}$$

2.7.8 Selección del ventilador

Para escoger el ventilador adecuado para el funcionamiento del sistema de aire, se debe considerar el cabezal y el caudal que se requieren. Se plantea entonces la ecuación de la energía entre los dos puntos de interés: la entrada de aire al ventilador y la salida por los extractores. Se tendría lo siguiente:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 + h_{p,sist} = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_f + h_m$$

En la cual se tienen presiones atmosféricas, velocidades y cabezal estático despreciables:

$$h_{p,sist} = h_f + h_m$$

Donde:

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g}$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1,8 \log \left[\left(\frac{\varepsilon}{3,7D} \right)^{1,11} + \frac{6,9}{Re} \right]$$

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu}$$

$$h_m = \sum K \frac{V^2}{2g}$$

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} V$$

En este punto, se aclara que la caída de presión debido al intercambiador se la trata como si fuera parte de las pérdidas menores, por lo tanto, se tendría:

$$h_{p,sist} = f \frac{L V^2}{D_h 2g} + \sum K \frac{V^2}{2g} + \frac{\Delta P}{\rho g}$$

Luego de reemplazar cada uno de los términos, incluyendo los coeficientes de pérdidas menores (White, 2011) se tiene:

$$h_{p,sist} = 67.9V^2 = 42447.2Q^2 [m^3/s] = 11.79Q^2 [m^3/h]$$

En este punto se debe graficar la curva del sistema sobre el gráfico del ventilador para obtener el punto de operación. Se seleccionó el ventilador modelo HCT 45-2T-2 (SODECA, 2013).

2.7.9 Sistema contra incendios

2.7.9.1 Análisis de riesgo

El riesgo de la cámara es de tipo alto o Riesgo Ordinario, grupo 2, como es catalogado en la norma de prevención de incendios (NFPA 13), se clasifica así

debido a que los pallets son de madera; que es un material inflamable. Así también la temperatura en la cámara es de aproximadamente 120 °C lo que facilitaría una ignición.

2.7.9.2 Método de extinción

Para este sistema como se manejará con madera es necesario emplear el método de extinción por enfriamiento. Consiste en el uso de una sustancia fría para aminorar las llamas, en este caso se utilizará agua.

2.7.9.3 Sistema de rociadores

Se seleccionó un sistema de rociadores para el desarrollo del proyecto, de tipo tubería húmeda que funcionará a la perfección debido a que la temperatura dentro de la cámara no será menor a 4 °C y para evitar la evaporación dentro de las tuberías se aislarán las mismas.

2.7.9.4 Determinación de caudal requerido

Para determinar el caudal se debe utilizar la tabla 2.13 según el riesgo que tenemos, para este caso ubicamos el de tipo ordinario.

Tabla 2.13 Requisitos de suministro de agua para sistemas de rociadores

Clasificación de la Ocupación	Presión Residual Mínima	Flujo Aceptable en la Base de la Tubería Vertical de Alimentación	Duración en Minutos
Riesgo Leve	15 psi	500 – 750 gpm	30 - 60
Riesgo Ordinario	20 psi	850 – 1500 gpm	60 - 90

Fuente: Norma NFPA 13 – Tabla 5-2.2

Siguiendo la norma NFPA para geometrías especial, ya que nuestro recinto excede el límite propuesto por las tablas y gráficos de la norma, un apartado determina que para áreas mayores se debe instalar al menos 15 rociadores distribuidos que es lo que se instalará en este proyecto.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS

3.1 Resumen de Resultados

En este punto, se destacan los resultados finales obtenidos a partir de los cálculos y dimensionamiento previo; considerándose los más principales como aquellos que definen el correcto funcionamiento del diseño realizado.

En primer lugar, se presenta que las dimensiones totales de la cámara diseñada son: 7.5x4.4x3 m; valor que fue determinado en base a las medidas de un pallet europeo estándar y una capacidad de 250 unidades, que conforman un lote de producción. Adicionalmente, se tiene también la distribución recomendada de los pallets dentro de la cámara para promover una buena ventilación; los respectivos planos generales la cámara, así como el arreglo de pallets se pueden observar en los apéndices.

Luego se advierte que la temperatura del aire que ingresará a la cámara es de 120°C, para de esta manera garantizar que el proceso de calentamiento de los pallets tomará como máximo 1 hora, si se asumen las condiciones menos favorables. Posterior a esta etapa transiente, se trabajará con condiciones de régimen estable durante 30 minutos más, tal como establece la NIMF N°15.

Continuando con los principales resultados, se presenta que el flujo másico de aire caliente requerido fue de 3.2 kg/s, que serán distribuidos por un sistema de ductos en el interior de la cámara, siendo éstos rectangulares con dimensiones de 250x250 mm. Con este flujo de aire se logra aumentar la temperatura de los pallets, disminuirle su humedad relativa de 35% a 20% y compensar las pérdidas térmicas a través de las paredes y el suelo.

En este punto, se presentan también los resultados de la simulación planteada en el capítulo anterior, a partir de los cuales se puede observar, en la figura 3.1, la distribución de temperatura de estado estable para el fluido en el interior de la cámara, tomando un valor promedio de 380 K

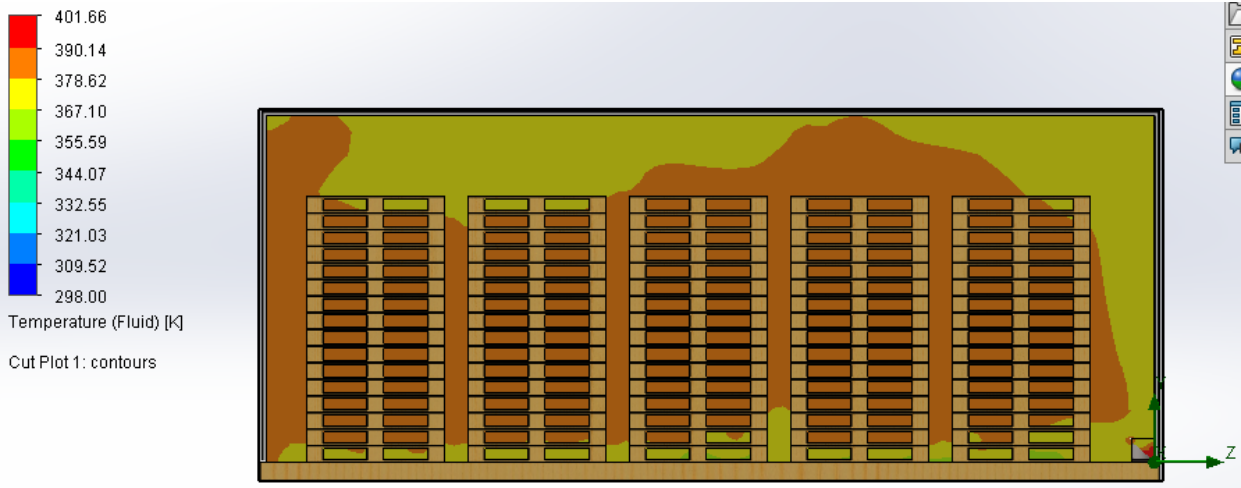


Figura 3.1 Distribución de temperatura del aire en el interior de la cámara

Elaboración Propia

Se destaca que esta distribución de temperatura es suficientemente homogénea en la zona en donde se ubican los pallets de madera, y que efectivamente se obtienen temperaturas dentro del rango esperado.

De la misma manera se presenta la distribución de temperatura en el interior de los sólidos, la cual se puede observar en la figura 3.2, se advierte que la distribución no es tan uniforme en los sólidos como en el fluido, obteniéndose zonas calientes y zonas frías; pero se destaca que la temperatura promedio es de 331 K, la temperatura mínima es de 329 K y una máxima de 338 K, lo cual está dentro del intervalo deseado.

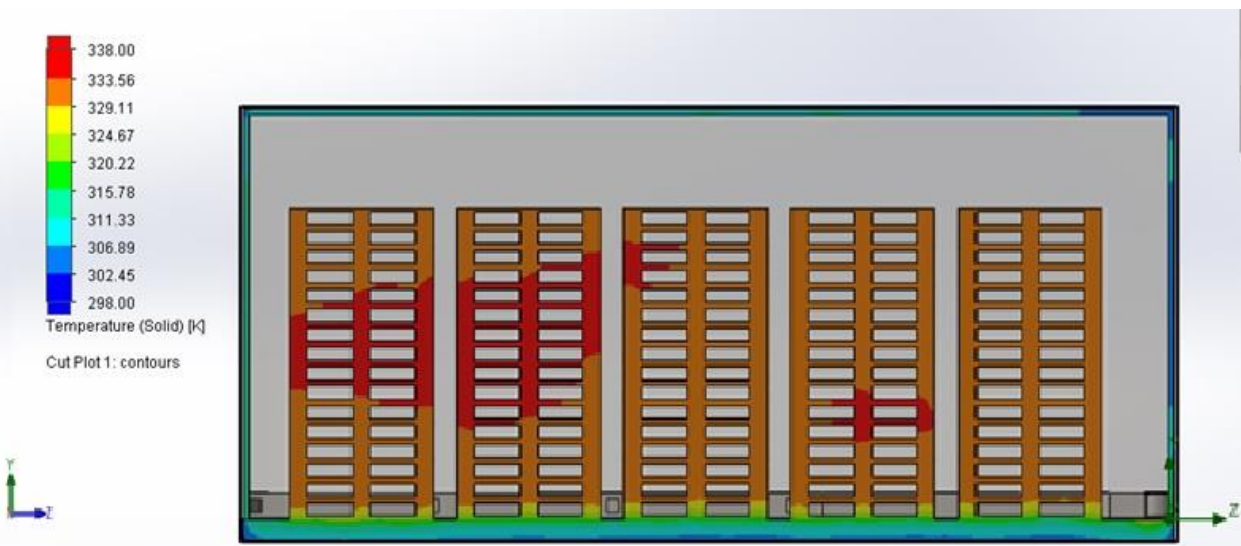


Figura 3.2 Distribución de temperatura de los sólidos

Elaboración Propia

Se obtuvo también que efectivamente, el espesor del piso de madera calculado es suficiente para no propagar los efectos de gradientes de temperatura más allá del mismo al cabo del tiempo que toma el proceso de sanitizado.

En base a estas distribuciones se infiere que la distribución del flujo másico a través del sistema de ductos y el uso de los extractores en la parte superior, logran condiciones satisfactorias para el flujo, sin requerir ventilación adicional en el interior de la cámara, pero no se lo descarta completamente.

El siguiente punto de interés fue el diseño del intercambiador de calor, que detalladamente se puede observar en los planos, pero entre los resultados generales tenemos que las dimensiones de su núcleo son de 0.65x0.65x1 m, es de flujo cruzado a manera de arreglo escalonado de banco de tubos de 0.676 pulgadas de diámetro, con los gases de combustión en el interior de los mismos.

Mientras que el aire en su superficie exterior; se exploró la alternativa de colocarle aletas rectangulares, por lo cual se seleccionó el arreglo geométrico de la superficie 7.75-5/8T (Kays & London, 1998), con ellas se mejoró el rendimiento térmico, pero se incrementaron los costos y la dificultad de manufactura, razón por la cual el intercambiador diseñado no posee aletas.

Las dimensiones establecidas son menores que las ideales, debido a que ellas son aproximadamente el doble y esto implicaría mayores costos; por lo tanto, se decidió incrementar el flujo másico de gases de combustión para alcanzar una temperatura de salida del aire de 120°C como se desea.

A continuación, en la figura 3.3 se presenta el intercambiador de calor, pero con cierto grado de transparencia para apreciar su interior:

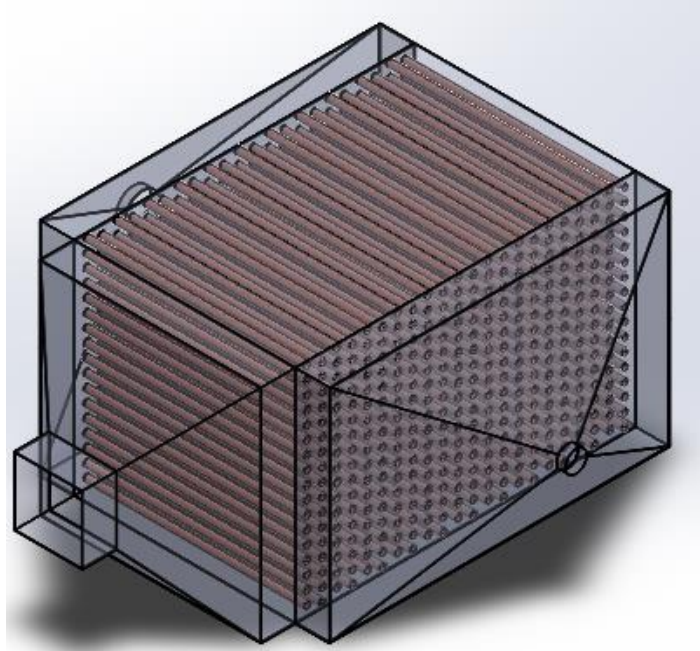


Figura 3.3 Intercambiador de calor diseñado

Elaboración Propia

Al continuar con lo obtenido en los cálculos del capítulo anterior tenemos que se trabajará con un exceso de aire del 30%, y que la relación de masa entre los gases de combustión y el diésel es de 89.6:1; con lo cual se tuvo un consumo de combustible de 24 galones por hora. Adicionalmente se tiene una caída de presión de aproximadamente 660 Pa para el aire que fluye al intercambiador.

Entre los otros principales resultados tenemos también que el ventilador seleccionado es el modelo HCT 45-2T-2 con un consumo de 1.5 kW de potencia (SODECA, 2013), se muestra su respectiva curva característica en la figura 3.4:

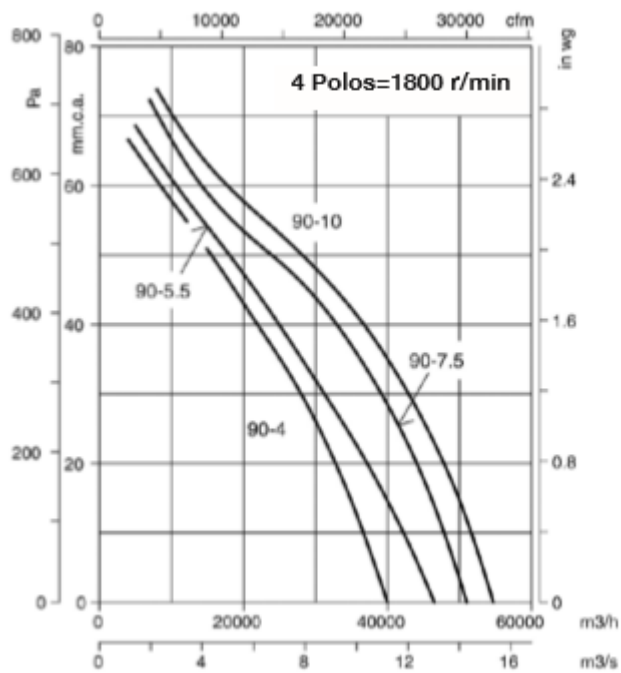


Figura 3.4. Curva característica de ventilador HCT 45-2T-2

Fuente: SODECA, 2013

El quemador por utilizarse se seleccionó en base al flujo másico de combustible y sería el modelo MAIOR 120 LN P 120 AB TC 110-50-60 TW (Ecoflam, 2012) cuya ilustración se muestra en la figura 3.5:

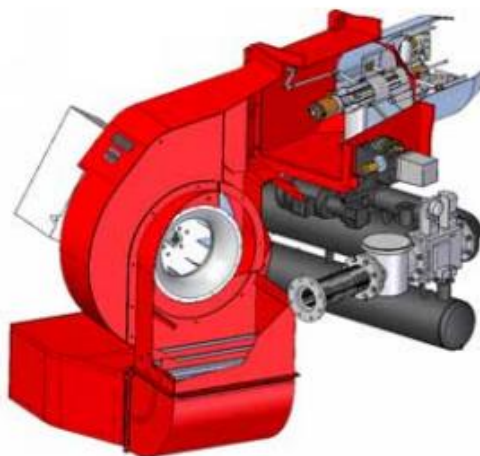


Figura 3.5 Quemador de diésel

Fuente: Ecoflam, 2012

Se realizará el análisis de costos, donde se presentará un desglose del costo total de elaboración de la cámara de tratamiento térmico de pallets de madera. Para ello se dividió el costo total en materiales y equipos; el costo de mano de obra no se consideró puesto que la construcción no entra en esta investigación. La tabla 3.1 muestra a detalle los costos existentes referentes a los materiales a utilizar para la fabricación, en la tabla 3.2 se detalla el costo total de equipos a implementar en el sistema y en la tabla 3.3 se detalla un costo total final sumando lo que se obtuvo entre los materiales y equipos.

Tabla 3.1 Desglose de costos de materiales

Desglose de costos de Materiales				
ITEM	DESCRIPCIÓN	COSTO UNIARIO	CANT	COSTO TOTAL
1	Paquete de lana de vidrio (6 unidades)	\$47,33	32	\$1.514,56
2	Plancha de acero galvanizado 1x2,44x1,22 mm	\$25,43	38	\$966,34
3	Perfil Tipo L 50x50x6000	\$29,03	6	\$174,18
4	Perfil Tipo C 50x40x6000	\$24,41	4	\$97,64
5	Remaches 1 x 3/16	\$0,01	1000	\$13,00
6	Perno 3/8 x 5	\$0,90	10	\$8,95
7	Tuerca 3/8 ACERO INOX	\$0,11	10	\$1,09
8	Arandela 3/8	\$0,08	20	\$1,60
9	Bisagra torneado 3/4"	\$1,16	4	\$4,64
10	Broca de cemento 6.5mm x 100	\$2,56	4	\$10,24
11	Tubo de cobre 2"	\$30,60	42	\$1.285,20
12	Tubería Glavanizada 2"	\$18,00	5	\$90,00
13	Rociadores automáticos	\$14,21	7	\$99,47
14	Termocupla Tipo K	\$10,00	3	\$30,00
16	Válvulas de paso	\$48,00	1	\$48,00
	Subtotal			\$4.344,91

Elaboración Propia

Tabla 3.2 Desglose de costos de equipos

Desglose de equipos				
ITEM	DESCRIPCIÓN	COSTO UNIARIO	CANT	COSTO TOTAL
17	Ventiladores 1.5 kW	\$250,00	4	\$1.000,00
18	Quemador de diesel industrial	\$980,00	1	\$980,00
	Subtotal			\$1.980,00

Elaboración Propia

Tabla 3.3 Costo total de cámara.

Tipo	Valor
Costo de Materiales	\$4.344,91
Costo de Equipos	\$1.980,00
TOTAL	\$10.669,81

Elaboración Propia

En cuanto al mantenimiento, se recomienda que deben realizarse mantenimiento cada 3 meses a los equipos y la revisión de las paredes aislante en caso de existir fuga de temperatura, así mismo es necesario un mantenimiento a los equipos de control como son las termocuplas.

3.2 Ventajas Económicas del Diseño.

Económicamente se logró mejorar el diseño que se utiliza en la actualidad con la implementación del intercambiador de calor y el cambio de combustible. Se presenta el siguiente análisis del caso:

3.2.1 Costos actuales de operación.

Para el sanitizado y secado de pallets se utilizan 8 tanques de gas GLP para un lote de producción, es decir los 8 tanques funcionando simultáneamente para cada lote. El costo de cada tanque es de \$16, en la tabla se detallan los gastos durante la producción anual.

Tabla 3.4 Análisis de costos de producción anual actual.

Costo de tanque de gas GLP	\$16
Cantidad de tanques utilizados por lote	8
Costo de producción por lote	\$128
Producción semanal de pallets	5
Costo total de producción semanal	\$640
Semanas en un año calendario	52
Costo total anual de producción	\$33,280

Elaboración Propia

3.2.1 Mejora de diseño

La diferencia radica en el uso del combustible, puesto que la mejora implementada es el uso de diésel en lugar de gas GLP. El costo unitario del galón de diésel es de \$1.35 dólares y como se observa en los resultados descritos en los resultados se necesita de 25 galones para la producción por lote. En la table 3.5 se detalla el análisis.

Tabla 3.5 Análisis de costos de producción con mejora.

Costo de galón de diésel	\$1,4
Cantidad de galones utilizados por lote	25
Costo de producción por lote	\$35
Producción semanal de pallets	5
Costo total de producción semanal	\$175
Semanas en un año calendario	52
Costo total anual de producción	\$9,100

Elaboración Propia

Entonces comparando costos se observa que el ahorro anual sería de \$24000 dólares aproximadamente, que pueden utilizarse en un futuro para recuperar el

costo de la inversión de del intercambiador y la cámara en conjunto. Y luego hacer inversión en las mejoras.

Cabe resaltar que la inversión más elevada se encuentra en la manufactura del intercambiador de calor, pues al ser un equipo de compleja manufactura, resultará en un costo más elevado para la inversión inicial. Más sin embargo a lo largo de la producción anual se recuperará el valor de la inversión y habrá más eficiencia lo que resulta en menos gastos dando como resultado más ingresos.

CAPÍTULO 4

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1 Discusión

Una vez completado el diseño de la cámara para el tratamiento térmico de pallets de madera, se enfatiza nuevamente que es indispensable la realización del proceso de sanitizado en los embalajes de madera para que puedan ingresar al mercado internacional cumpliendo con la normativa fitosanitaria NIMF N°15 que regula la propagación de plagas en la madera. Por lo tanto, el trabajo realizado es de suma importancia para los fabricantes de pallets de madera; y específicamente se esculpíó nuestro diseño en base a las consideraciones de potenciales usuarios ubicados en el cantón Durán.

Su importancia se evidencia aún más en las fortalezas del diseño realizado, puesto que los equipos existentes operan con un combustible de alto costo, no logran disminuir significativamente la humedad relativa de la madera y presentan riesgos de incendios esporádicos.

Entonces se resalta que nuestro diseño posee menores costos de operación ya que el diésel es mucho más barato que el gas licuado de petróleo, de la misma manera se destaca que efectivamente logra una disminución considerable en el porcentaje de humedad relativa de la madera, lo cual significaría un ahorro de tiempo en la entrega de los pallets al cliente que puede ir de 3 días hasta 2 semanas; y finalmente, al no ingresar los gases de combustión a alta temperatura directamente a la cámara tal como sucede en los equipos utilizados actualmente, se disminuirá casi completamente el riesgo de incendio.

En cambio entre las debilidades principales tenemos el control de emisiones y productos de la combustión del diésel, lo cual se puede lograr utilizando un porcentaje de exceso de aire adecuado; y también el elevado consumo de combustible requerido para lograr la temperatura de salida deseada para el aire, en esta situación se propone realizar una inversión en dos partes para el intercambiador de calor, durante el primer año de operación se trabajaría con las

dimensiones detalladas anteriormente pero después se incrementará una segunda etapa que mejoraría la efectividad de la transferencia de calor, disminuyendo considerablemente el consumo de diésel y consecuentemente también las emisiones.

4.2 Conclusiones

- Luego de haber analizado todos los resultados obtenidos en el diseño de la cámara y sus componentes, se puede afirmar que se logró cumplir satisfactoriamente con los objetivos planteados inicialmente. En primer lugar, se debe considerar que se tomaron en cuenta las situaciones críticas o menos favorables para el dimensionamiento y cálculo de cada uno de los componentes; por lo tanto, se espera un rendimiento mejor al descrito a lo largo de este documento.
- De igual manera se advierte que los modelos utilizados para simplificar cada problema involucrado en el diseño de la cámara son aproximaciones de nivel aceptable, lo cual es la mera aplicación de la ingeniería. Entre ellos tenemos modelos de transferencia de calor a través de paredes planas, sólido semi-infinito, balances de masa y energía para volúmenes de control, procesos de acondicionamiento de aire y psicrometría, selección de turbo-maquinaria, reacciones ideales de combustión, entre otros. Todos ellos fueron validados también por los resultados de la simulación realizada, puesto que se encontraban en plena concordancia.
- Adicionalmente, con respecto a la simulación se puede concluir que efectivamente existe un grado aceptable de homogeneidad en el flujo y la ventilación en el interior de la cámara, puesto que, al observar las distribuciones de temperatura tanto para el fluido como para los sólidos, se advierte que las regiones que poseen gradientes de temperatura se encuentran aisladas de la zona de nuestro interés y que su tamaño no es comparable con el resto de la cámara que si posee la uniformidad deseada.

- En lo referente al intercambiador de calor, se reafirma que el proceso de diseño verdaderamente consiste en buscar el equilibrio entre los factores de desempeño, costo, manufactura, seguridad y demás. La solución ideal para el problema del intercambiador de calor fue exageradamente grande y no aceptable, por lo cual fue necesario establecer dimensiones alcanzables en términos de costos y manufactura sacrificando la efectividad en el desempeño del dispositivo. Se concluye que mientras mayor es el área de transferencia de calor para el intercambiador, más alta será su efectividad. De la misma manera, se advierte que el uso de superficies extendidas tal como las aletas rectangulares mejoran el desempeño térmico del intercambiador mucho más del incremento que implican en términos de potencia necesaria para el flujo; pero los costos y dificultad de manufactura también incrementan
- Finalmente se destaca que el diseño realizado si involucra menores costos de operación y comparables costos de manufactura; sus principales ventajas sobre los equipos existentes se encuentran en su desempeño.

4.3 Recomendaciones

- Se sugiere fervientemente el acoplamiento de una segunda etapa en el intercambiador que complete las dimensiones necesarias para una efectividad mayor, pero esto se puede realizar luego de haber recuperado la inversión inicial.
- De la misma manera se recomienda considerar con mayor profundidad los efectos de puentes térmicos en el cálculo de las pérdidas térmicas puesto que ellos pueden llegar a representar alrededor de un 15% adicional.
- Se sugiere también realizar trabajo experimental en el fenómeno de transferencia de humedad a través de la madera, para poder entender mejor el proceso.
- Para terminar, también se recomienda el uso de un intercambiador de calor de pasos múltiples para que a la finalización de su vida útil se reemplace solo el componente afectado.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] EPAL EURO PALLET (EPAL 1). (2017, Febrero 14). Tomado Junio 24, 2017, de <https://www.epal-pallets.org/eu-en/load-carriers/epal-euro-pallet/>
- [2] Incropera, F. P. (2013). Fundamentos de Transferencia de Calor y Masa. Hoboken, NJ: Wiley
- [3] AGROCALIDAD – Agencia Ecuatoriana de Aseguramiento de la Calidad del Agro. (2015, Abril). Tomado Junio 24, 2017, de <http://www.agrocalidad.gob.ec/wp-content/uploads/2015/04/NIMF-151.pdf>
- [4] Visita técnica a Ecuapallets, Durán, realizada el 24 de mayo del 2017
- [5] Nyle Systems. Tomado Junio 24, 2017, de http://www.nyle.com/downloads/KilnDrying_ES.pdf
- [6] 1100 millones de personas corren el riesgo de sufrir pérdida de audición. (n.d.). Tomado 27 de Julio, 2017, de <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2015/ear-care/es/>
- [7] Visita técnica a INDUZAM, taller de construcción y mantenimiento de cámaras de tratamiento térmico de pallets, Durán, realizada el 31 de Julio del 2017
- [8] Ministerio del ambiente, Acuerdo Ministerial No. 50 NCA, Quito, 2011, Gobierno del Ecuador.
- [9] Janna, W. S. (2015). Design of fluid thermal systems. Stamford, CT: Cengage Learning.
- [10] Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2015). Thermodynamics: an engineering approach. New York: McGraw-Hill Education.
- [11] EnergyPlus, Building Physics, Insulation Training Guide, 2010
- [12] ISO 13370: Thermal performance of buildings: heat transfer via the ground: calculation methods. (1998). London: BSI.
- [13] Kreith, F., Manglik, R. M., & Bohn, M. S. (2013). Principios de transferencia de calor. México: Cengage Learning.
- [14] Manual de conductos de aire acondicionado: CLIMAVÉR. (1995). Madrid: Cristalería Española.
- [15] Kays, W., & London, A. (1998). Compact heat exchangers. Malabar, FL: Krieger Pub. Co.
- [16] Turgut, S. (2011). SolidWorks: SolidWorks Simulation, SolidWorks Motion, SolidWorks MoldFlow. İstanbul: Seçkin Yayıncılık.

[17] TEMA (1999). "Standards of the tubular exchangers manufacturers association, 8th edition"

[18] T. (n.d.). Productos. Retrieved August 20, 2017, from <http://www.ipac-acero.com/productos.php>

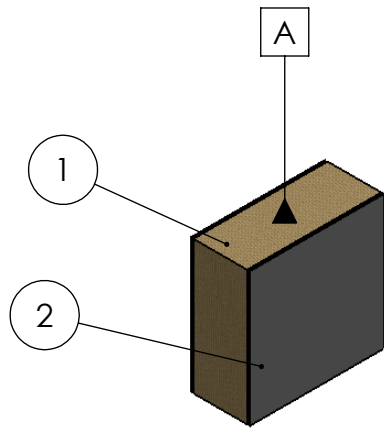
[19] White, F. M. (2011). Fluid mechanics. New York, NY: McGraw-Hill Education.

[20] Sodeca: catalogo general = General catalogue = Catalogue général = Gesamtkatalog. (2013). Sant Quirze de Besora: Sodeca.

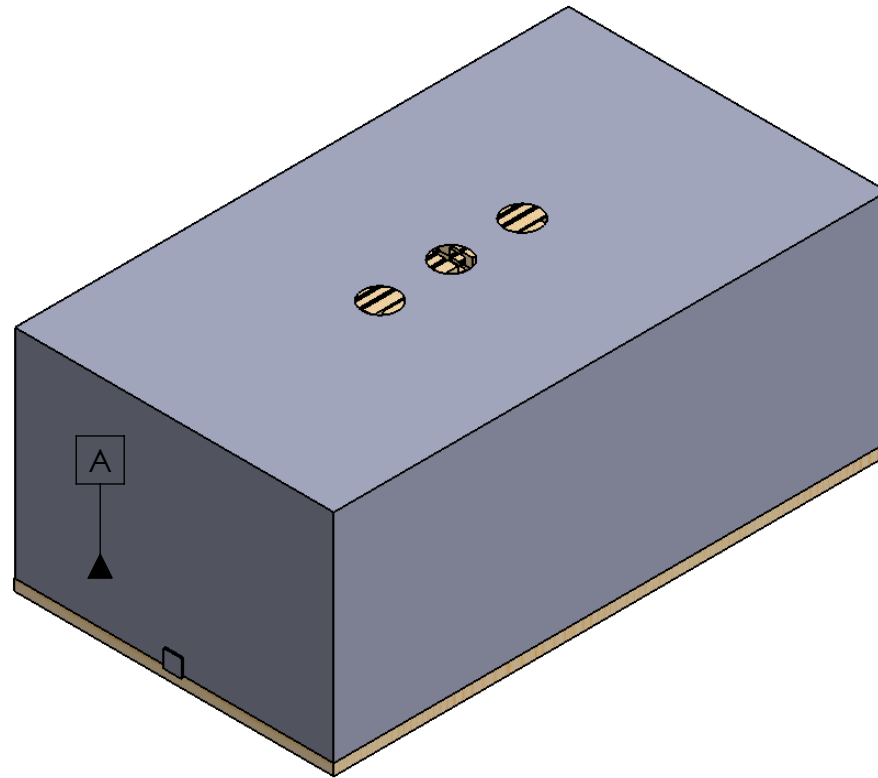
[21] Ecoflam: catalogo general. (2012).

APÉNDICES

APÉNDICE A
Planos Esquemáticos



ESCALA 1 : 4



ESCALA 1 : 75

# ELEMENTO	DETALLE
1	Lana de vidrio
2	Plancha de acero



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

	NOMBRE	FIRMA	FECHA		
DIBUJ.	Diaz Jan		10/08/17		
VERIF.	Zabala Gonzalo		18/08/17		
APROB.	Zabala Gonzalo		18/08/17		
				MATERIAL:	
				Madera de pino, acero galvanizado	
				PESO:	

TÍTULO:

Diseño de cámara de pre-tratamiento de pallets de madera.

N.º DE DIBUJO

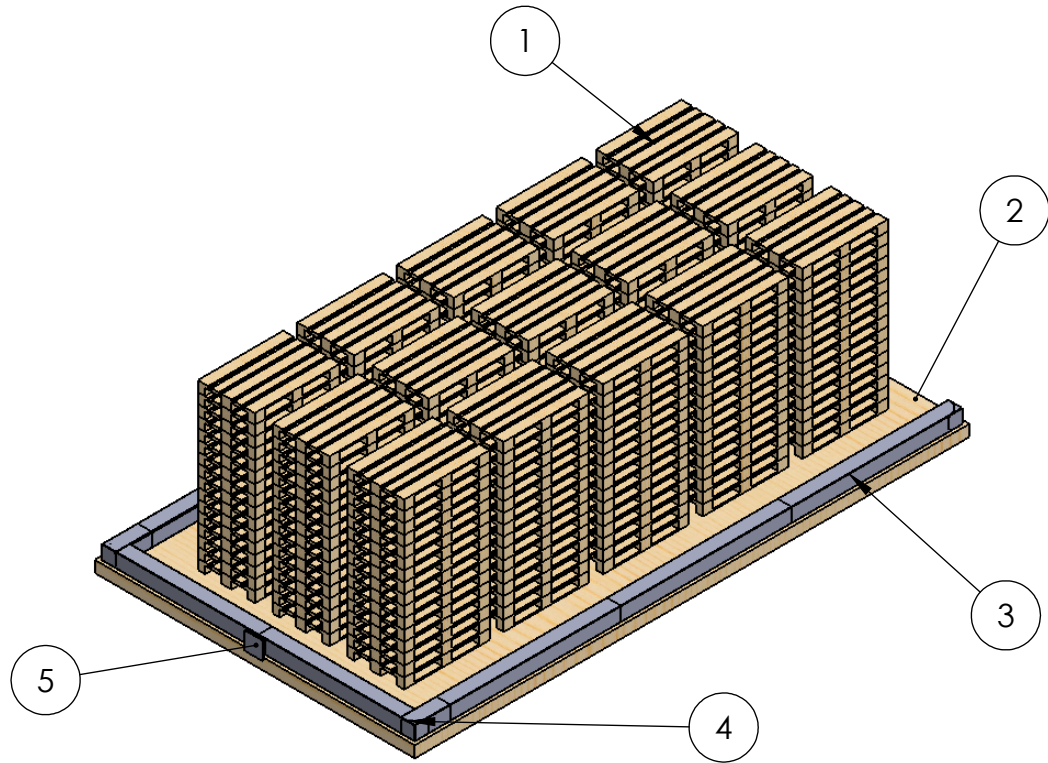
Detalle de sección de pared de cámara.

A4

ESCALA: Variada

HOJA 5 DE 6

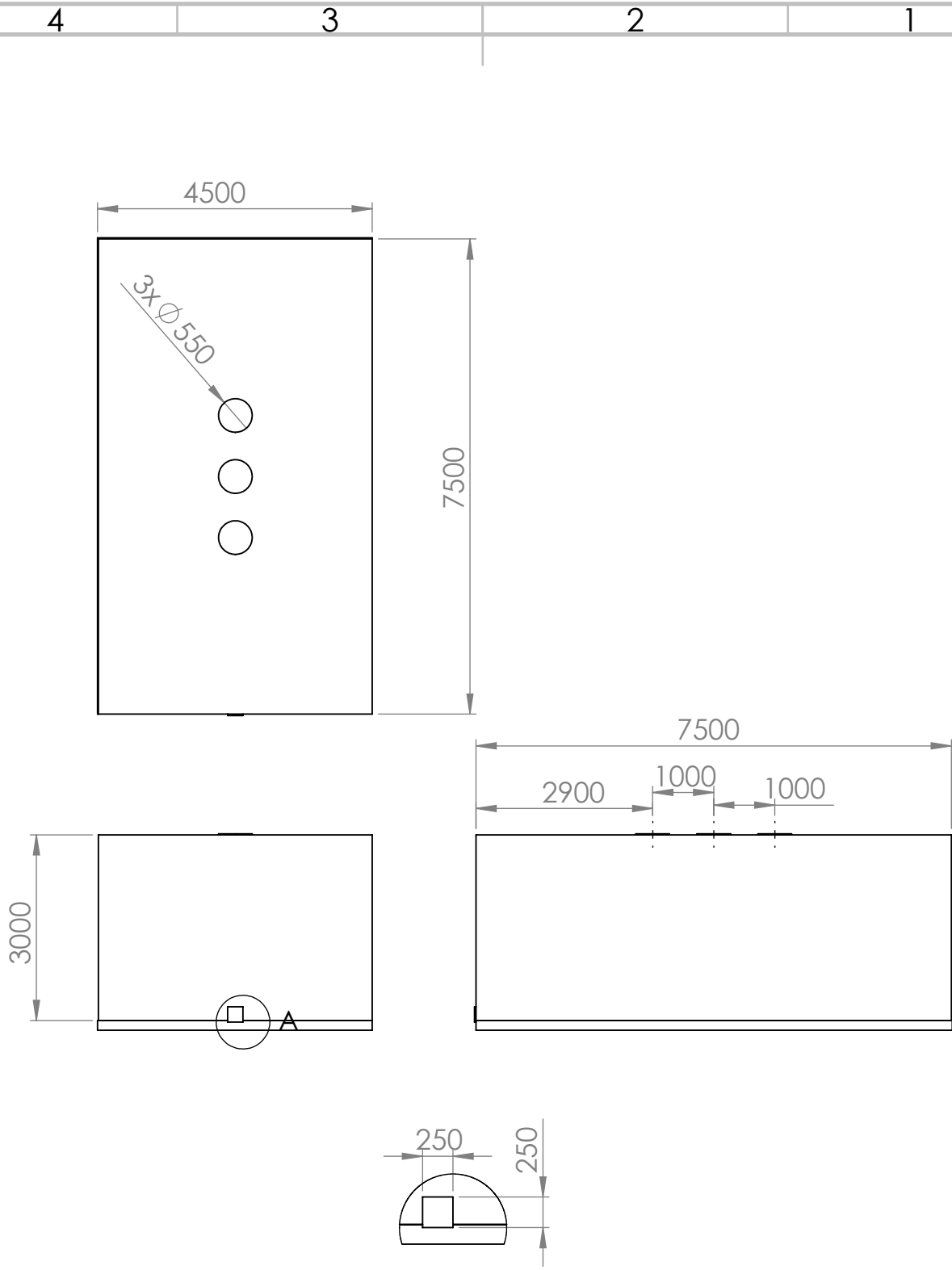
#ELEMENTO	DETALLE
1	Torre de pallets
2	Suelo de cámara
3	Ducto de ventilación
4	Deflectores
5	Entrada de aire caliente



ESCALA 1 : 75

						ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL	
				TÍTULO:			
				Diseño de cámara de pre-tratamiento de pallets de madera.			
				MATERIAL:		N.º DE DIBUJO	
				Madera de pino, acero galvanizado		Vista interna de cámara.	
				PESO:		ESCALA: 1:75	
						HOJA 1 DE 6	

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.	Diaz Jan		10/08/17
VERIF.	Zabala Gonzalo		18/08/17
APROB.	Zabala Gonzalo		18/08/17



DETALLE A
ESCALA 1 : 50

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL:
ANGULAR:

ACABADO:



NO CAMBIE LA ESCALA REVISIÓN

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.	Marco Robalino		
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CALID.			

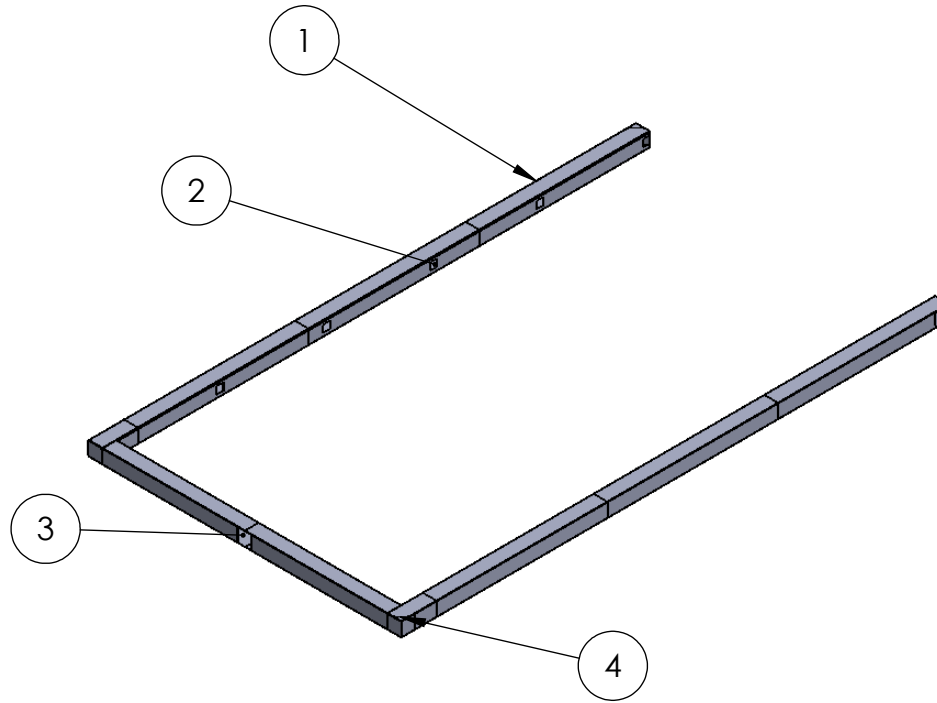
TÍTULO:
**Diseño de una cámara de
tratamiento térmico de
pallets de madera**

N.º DE DIBUJO
Cámara

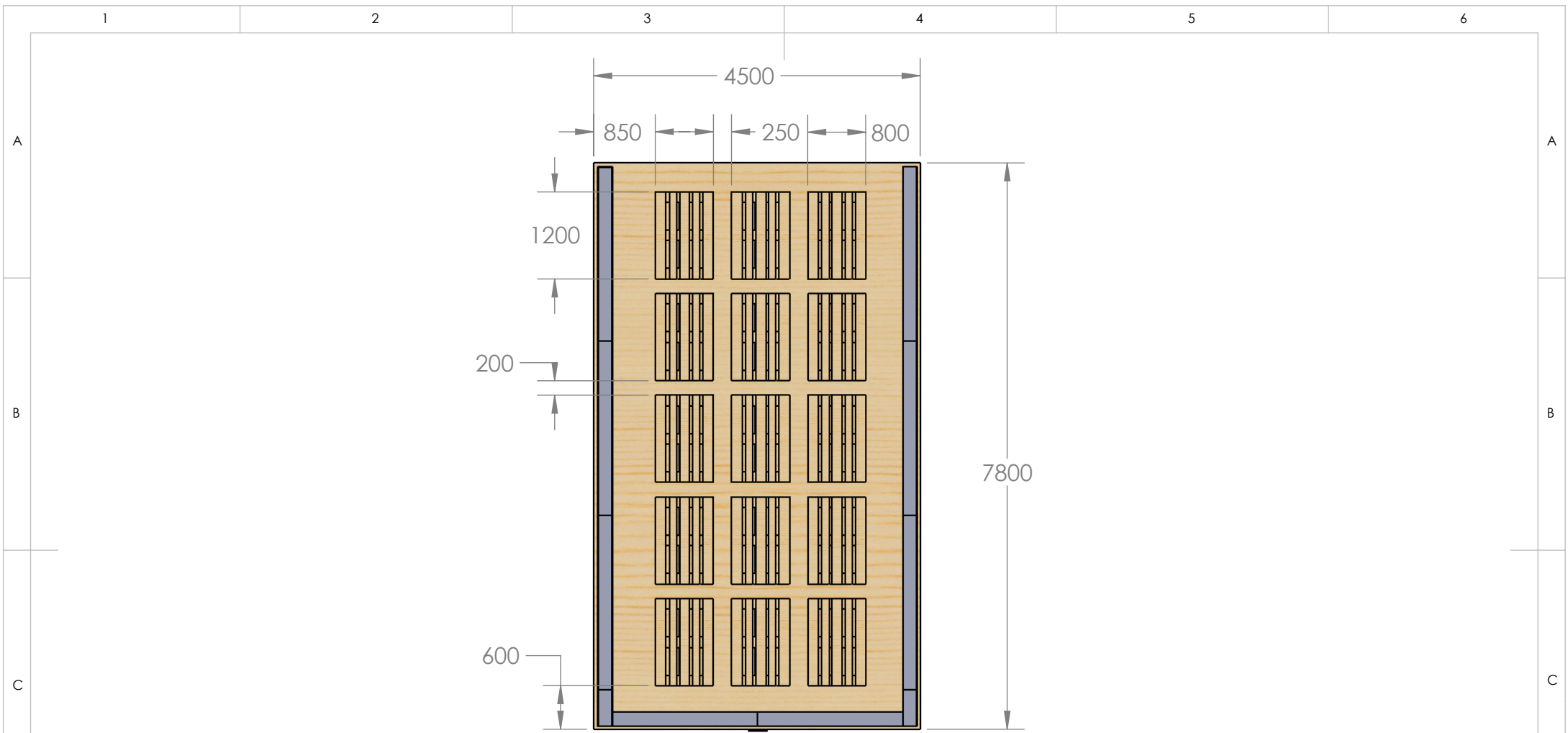
A4

PESO: ESCALA:1:200 HOJA 1 DE 1

#ELEMENTO	DETALLE
1	Ducto principal
2	Boquete de salida de aire caliente
3	Boquete de entrada
4	Deflector de aire



						ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL	
				TÍTULO: Diseño de cámara de pre-tratamiento de pallets de madera.			
				MATERIAL: Madera de pino, acero galvanizado		N.º DE DIBUJO Detalles de ducto de ventilación.	
				PESO: 100 Kg		ESCALA: 1:75	
						HOJA 4 DE 6	



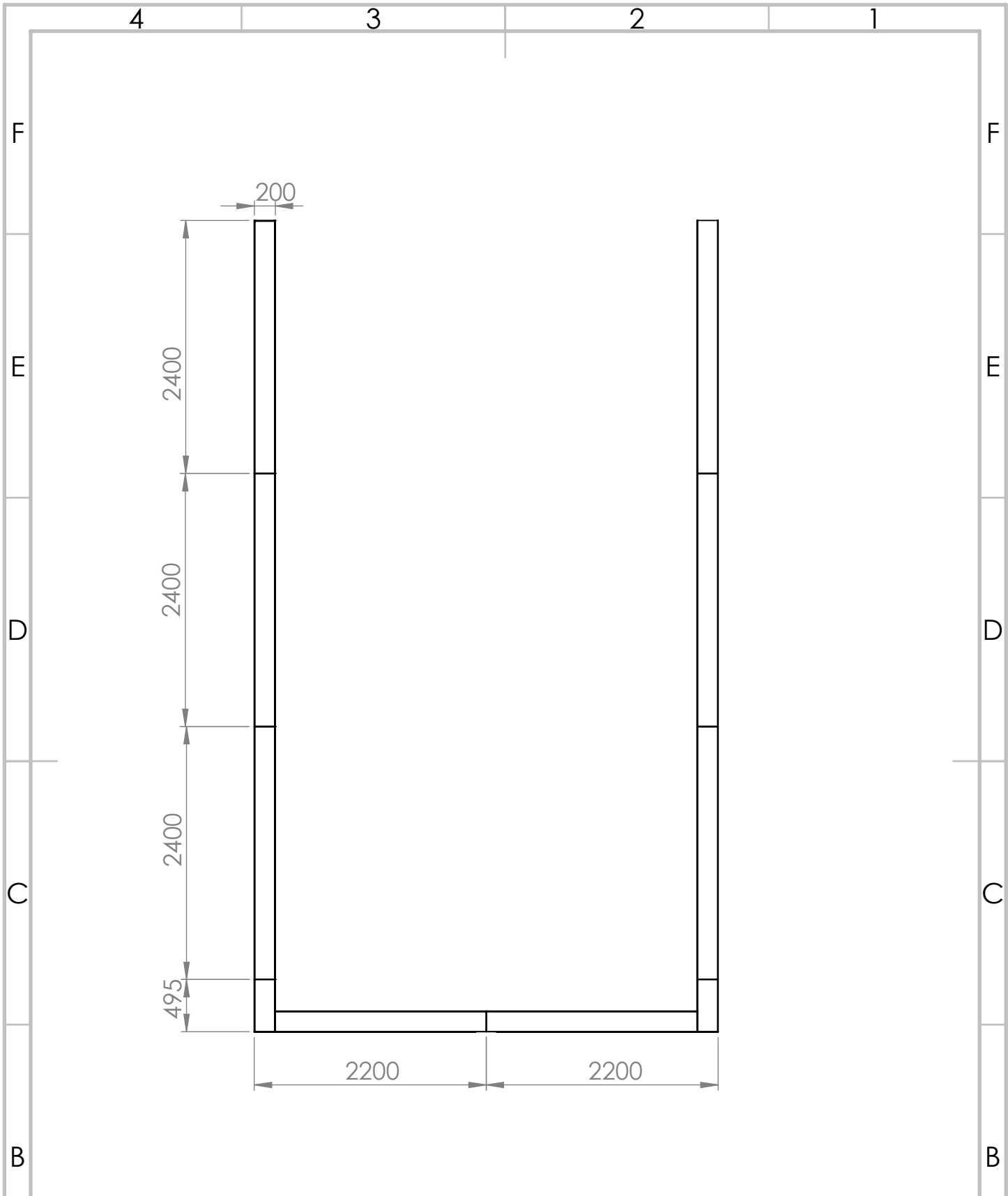
ESCALA 1 : 75



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.	Diaz Jan		10/08/17
VERIF.	Zabala Gonzalo		18/08/17
APROB.	Zabala Gonzalo		18/08/17

TÍTULO:	
Diseño de cámara de pre-tratamiento de pallets de madera.	
N.º DE DIBUJO	A4
Arreglo de torres de pallets en cámara.	
ESCALA: 1:75	HOJA 2 DE 6



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:



NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

TÍTULO:

Diseño de una cámara de
 tratamiento térmico de
 pallets de madera

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.	Marco Robalino		
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CALID.			

MATERIAL:

N.º DE DIBUJO

Ducto Completo

A4

PESO:

ESCALA:1:200

HOJA 1 DE 1

4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

C

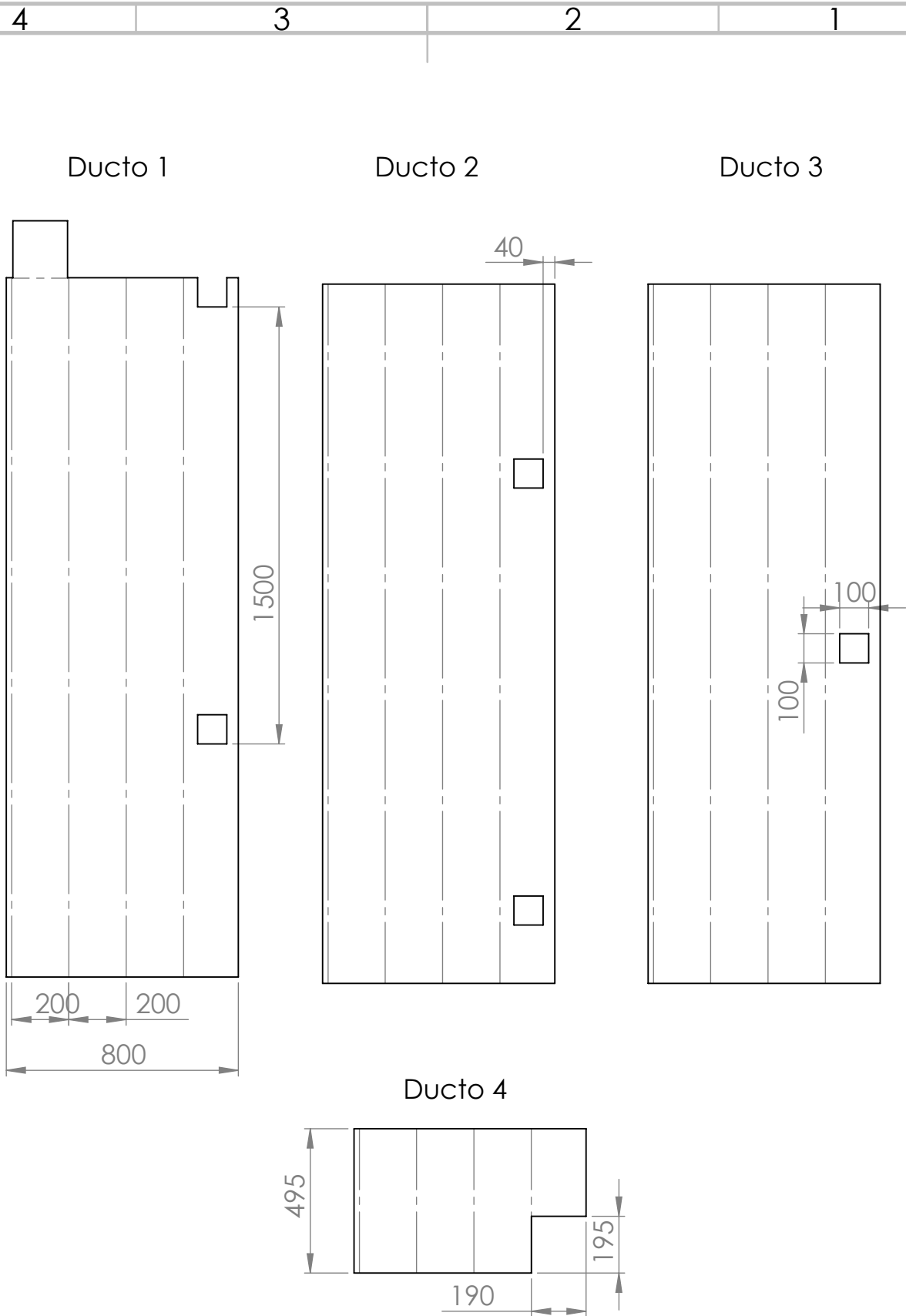
B

B

A

A

4 3 2 1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:



NO CAMBIE LA ESCALA REVISIÓN

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

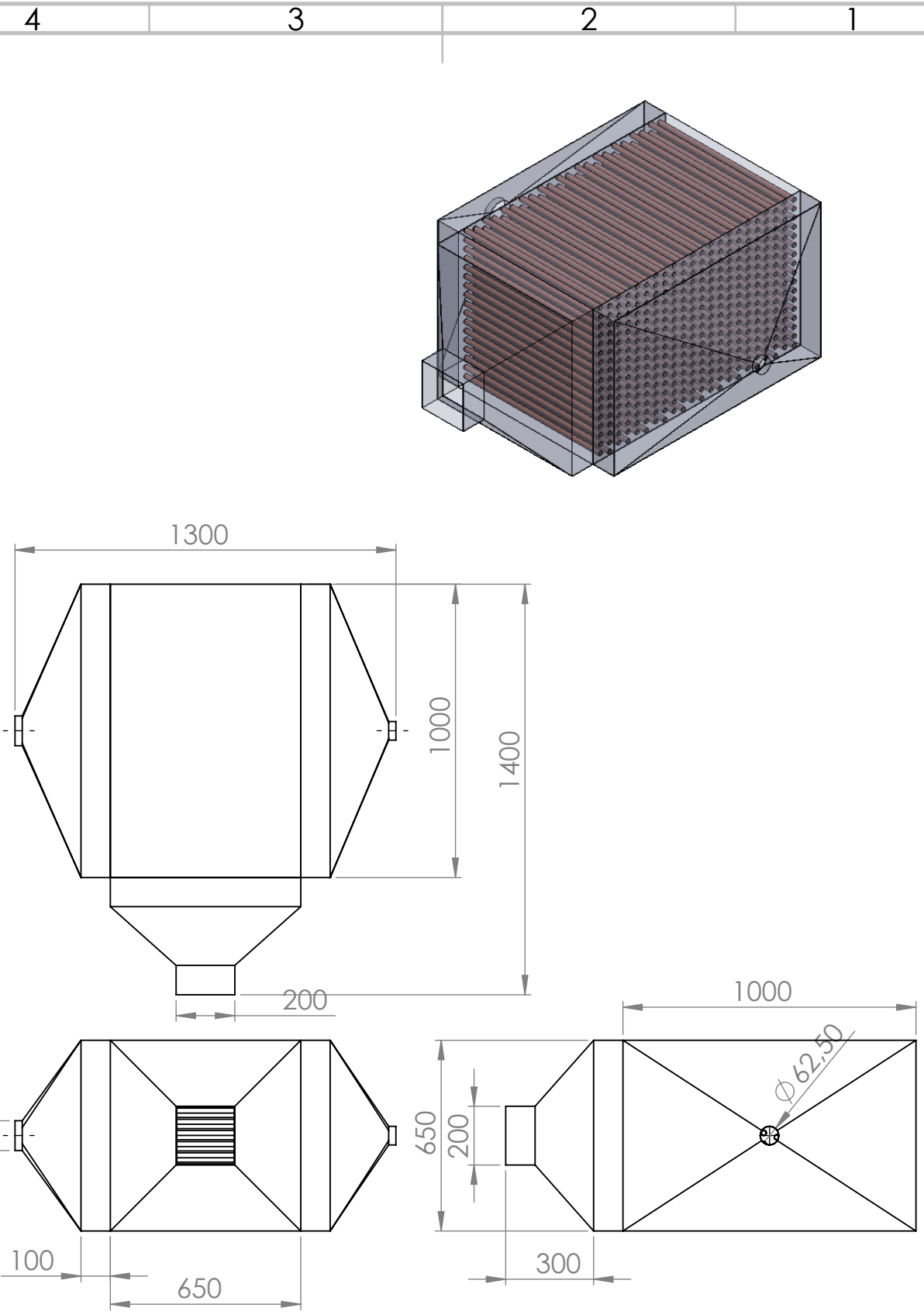
	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.	Marco Robalino		
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CALID.			

TÍTULO:
**Diseño de una cámara de
 tratamiento térmico de
 pallets de madera**

N.º DE DIBUJO
Ductos 1 - 4

A4

PESO: ESCALA:1:50 HOJA 1 DE 1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:



NO CAMBIE LA ESCALA REVISIÓN

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.	Marco Robalino		
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CALID.			

TÍTULO:
**Diseño de una cámara de
 tratamiento térmico de
 pallets de madera**

N.º DE DIBUJO
Intercambiador de calor

A4

PESO: ESCALA: 1:50 HOJA 1 DE 1

4 3 2 1

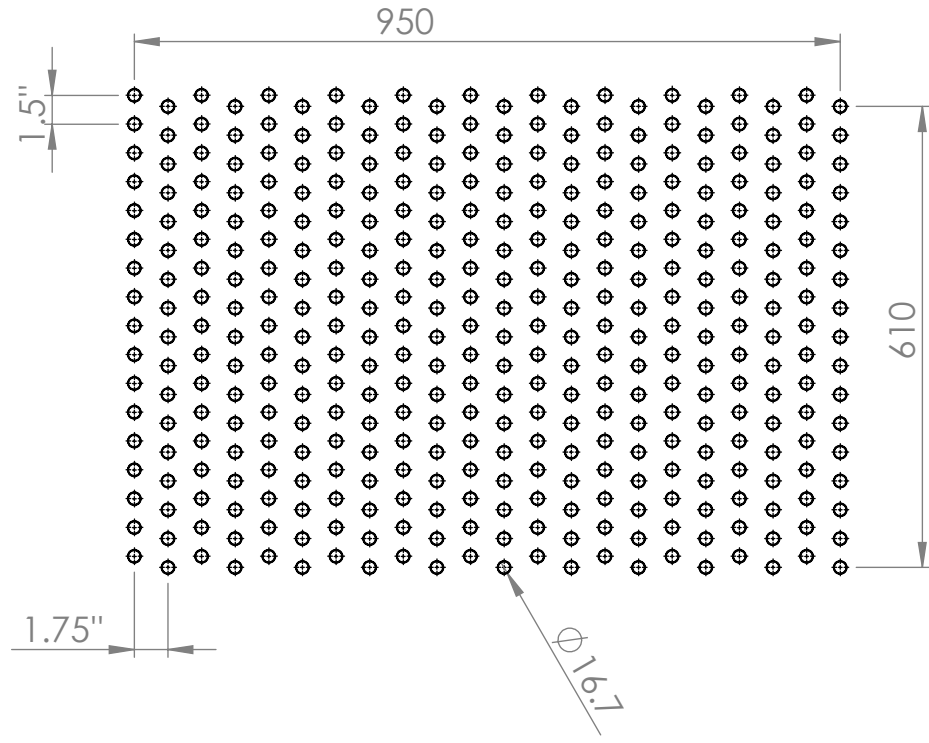
F

F

E

E

Banco de Tubos



D

D

C

C

B

B

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:



NO CAMBIE LA ESCALA REVISIÓN

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.	Marco Robalino		
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CALID.			

TÍTULO:
 Diseño de una cámara de
 tratamiento térmico de
 pallets de madera

N.º DE DIBUJO
Banco de Tubos A4

A

A

4 3 2 1