



UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
CARRERA INGENIERÍA MECÁNICA

Proyecto de Investigación previo la
obtención del título de Ingeniero
Mecánico.

Título del Proyecto de Investigación:

“Diseño y simulación de una cámara de secado para madera de balsa, mediante el análisis
térmico y estructural para mejorar la eficiencia de secado.”

Autores:

Diaz Coello Julio Sebastián
Garofalo Zambrano Julio Alberto

Director de Proyecto de Investigación:

Ing. Ernesto Javier Ruano Herrería. Msc

Quevedo – Los Ríos - Ecuador

2020 - 2021

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Nosotros, **Julio Sebastián Díaz Coello** y **Julio Alberto Garofalo Zambrano**, declaramos que la investigación aquí descrita es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Universidad Técnica Estatal de Quevedo, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este documento, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Julio Sebastián Díaz Coello

C.I. 1250723937

Julio Alberto Garofalo Zambrano

C.I. 1206792499

CERTIFICACIÓN DE CULMINACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

El suscrito, **Ing. ERNESTO JAVIER RUANO HERRERÍA MSc.**, Docente de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, certifica que los estudiantes **JULIO SEBASTIÁN DÍAZ COELLO** y **JULIO ALBERTO GARÓFALO ZAMBRANO**, realizaron el Proyecto de Investigación de grado titulado “**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA CÁMARA DE SECADO PARA MADERA DE Balsa mediante el Análisis Térmico y Estructural para mejorar la eficiencia de secado**” previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico, bajo mi dirección, habiendo cumplido con las disposiciones reglamentarias establecidas para el efecto.

Ing. Ernesto Javier Ruano Herrería MSc.

DIRECTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

CERTIFICADO DE REPORTE DE LA HERRAMIENTA DE PREVENCIÓN DE COINCIDENCIA Y/O PLAGIO ACADÉMICO

Ing. ERNESTO JAVIER RUANO HERRERÍA, MSc. en calidad de director de Proyecto de Investigación titulado **“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA CÁMARA DE SECADO PARA MADERA DE BALSA MEDIANTE EL ANÁLISIS TÉRMICO Y ESTRUCTURAL PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE SECADO”** me permito manifestar a usted y por intermedio al Consejo Académico de Facultad lo siguiente:

Que, los estudiantes **JULIO SEBASTIÁN DÍAZ COELLO** y **JULIO ALBERTO GARÓFALO ZAMBRANO** egresados de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería, han cumplido con las correcciones pertinentes, e ingresado su Proyecto de Investigación al sistema URKUND, tengo a bien certificar la siguiente información sobre el informe del sistema anti plagio con un porcentaje de 6%.



URKUND	
Documento	Tesis_Final.pdf (D102603247)
Presentado	2021-04-22 16:20 (-05:00)
Presentado por	Ernesto Ruano (eruano@uteq.edu.ec)
Recibido	eruano.uteq@analysis.arkund.com
Mensaje	TESIS DÍAZ - GARÓFALO Mostrar el mensaje completo
	6% de estas 52 páginas, se componen de texto presente en 14 fuentes.

Ing. Ernesto Javier Ruano Herrería MSc.

DIRECTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN



UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
CARRERA INGENIERÍA MECÁNICA

Título:

“Diseño y simulación de una cámara de secado para madera de balsa, mediante el análisis térmico y estructural para mejorar la eficiencia de secado.”

Presentado al Consejo Directivo como requisito previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

Aprobado por:

Ing. Gabriel Arellano Ortiz
Presidente del Tribunal

Ing. Yusimit Zamora Hernández
Miembro del Tribunal

Ing. Cristian Topa Chuquitarco
Miembro del Tribunal

QUEVEDO- LOS RIOS- ECUADOR
AÑO 2021

AGRADECIMIENTO

Repletos de alegría y satisfacción agradecemos a Dios por darnos la sabiduría y fortaleza, a nuestras queridas familias por su amor y apoyo incondicional.

Agradecemos a la Universidad Técnica Estatal de Quevedo y a la Facultad de Ciencias de la Ingeniería quienes nos abrieron sus puertas para cursar nuestros estudios, al Ing. Ernesto Ruano Herrería por su asistencia en la realización de esta investigación y a nuestros compañeros de clases por la amistad formada a lo largo de nuestra carrera.

Dios les Bendiga

DEDICATORIA

A Dios por su infinito amor y darme salud para seguir adelante.

A mi familia, por el apoyo incondicional brindado a lo largo del camino y la formación ética inculcada. En especial a mi madre y abuela, fuente de motivación para alcanzar las metas que me proponga.

A mi abuelo, que siempre lo llevo presente en mis pensamientos y desde el cielo siempre me ha ofrecido su protección.

Julio Díaz Coello

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo de investigación a Dios, a mis padres Ángel Garofalo Jiménez y Digna Zambrano Llanos, por su amor y apoyo incondicional, a mis hermanos Stefano Garofalo Zambrano, Angela Garofalo Zambrano y Omar Garofalo Zambrano a ellos por ser mi mayor motivación, a todos ellos les reitero mi cariño. Deseo pronunciar a mi familia que de una u otra manera me han dado su apoyo incondicional a lo largo de mi carrera universitaria.

Julio Garofalo Zambrano

RESUMEN Y PALABRAS CLAVES

Este proyecto de investigación tiene como finalidad el diseño y simulación de una cámara de secado para madera de balsa, para mejorar la eficiencia de secado, como también la determinación de las propiedades y características termo-físicas de la madera. Mediante el uso de criterios ponderados se seleccionó el diseño más adecuado, que consta de recubrimientos metálicos y lana de vidrio, ya que estos necesitan un menor flujo de calor para alcanzar la temperatura de operación y mayor resistencia a la conductividad térmica.

La cámara de secado se diseñó para secar $20,5 m^3$ de madera de balsa, con una altura de $4 m$, ancho de $4,45 m$, profundidad de $7,4 m$ y un ángulo de caída de 3° , este se lo realizó con la ayuda del software CAD SOLIDWORKS, además de aplicar un análisis de elementos finitos estructural, donde la mayor deformación que presenta la estructura es el techado alcanzando los $4 mm$ y un factor de seguridad mínimo de $n_{min} = 7,78$.

Mediante la determinación de los parámetros de diseño para la selección de los componentes del sistema calefactor y de ventilación, se seleccionó dos serpentines que cuenta con 22 tubos de una pulgada de diámetro nominal y 2 metros de largo, se requiere un ventilador de tipo axial de seis palas con un diámetro de hélice de $1,25 m$. Con la determinación del programa de secado, se realizó la comparación de una cámara de secado convencional y el diseño estudiado, el cual presentó una disminución de pérdidas de calor por las paredes, con una eficiencia de 3 a 1, pero obteniendo un mismo tiempo de secado de aproximante $155,9 h$ (7 días aproximante), para alcanzar un porcentaje de humedad del 12 %.

Palabras claves: balsa, cámara de secado, secado de madera, análisis estructural, análisis térmico.

ABSTRACT AND KEYWORDS

The purpose of this research project was the design and simulation of a drying chamber for balsa wood to improve the drying efficiency, jointly with the determination of the properties and thermo-physical characteristics of the wood. By using weighted criteria, the most suitable design was selected, which consists of metallic coatings and glass wool, since these require less heat flow to reach operating temperatures and greater resistance to thermal conductivity.

The drying chamber was designed to dry $20,5 \text{ m}^3$ of balsa wood, with a height of 4 m , width of $4,45 \text{ m}$, a depth of $7,4 \text{ m}$ and a fall angle of 3° . This was done with the help of SOLIDWORKS CAD software, in addition to applying a structural finite element analysis, where the greatest deformation of the structure is the roof, reaching 4 mm and a minimum safety factor of $n_{min} = 7,78$.

By determining the design parameters for the selection of the components of the heating and ventilation system, two coils were selected that have 22 tubes of one inch in nominal diameter and 2 meters long, an axial type fan of six blades with a propeller diameter of 1.25 m . With the determination of the drying program, the comparison of a conventional drying chamber and the studied design was carried out, which showed a reduction in heat losses through the walls, with an efficiency of 3 to 1, but obtaining the same time of drying for approximately $155,9 \text{ h}$ (around 7 days), to reach a humidity percentage of 12%.

Keywords: raft, drying chamber, wood drying, structural analysis, thermal analysis.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN DE AUDITORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS	ii
CERTIFICACIÓN DE CULMINACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN ..	iii
CERTIFICADO DE REPORTE DE LA HERRAMIENTA DE PREVENCIÓN DE COINCIDENCIA Y/O PLAGIO ACADÉMICO	iv
CERTIFICADO DE APROBACIÓN POR TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN	
AGRADECIMIENTO	vi
DEDICATORIA	vii
RESUMEN Y PALABRAS CLAVES	ix
ABSTRACT AND KEYWORDS	x
CÓDIGO DUBLIN	xxi
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	3
1.1. Problema de la investigación	4
1.1.1. Planteamiento del problema	4
1.1.2. Formulación del problema	5
1.1.3. Sistematización del problema	5
1.2. Objetivos	6
1.2.1. Objetivo General	6
1.2.2. Objetivos Específicos	6
1.3. Justificación	7
CAPÍTULO II	8
2.1. Marco conceptual	9
2.1.1. Balsa	9
2.1.2. Humedad en la madera	9
2.1.3. Punto de saturación de las fibras	10

2.1.4. Capa límite de la madera	10
2.1.5. Migración de fluidos en la madera.....	11
2.1.6. Secado de la madera.....	11
2.1.7. Parámetros influyentes en el secado de la madera	11
2.1.8. Defectos de secado en la madera	13
2.1.9. Categorías de defectos.....	13
2.1.10. Etapas del proceso secado	15
2.1.11. Aspectos prácticos para el secado de la madera	16
2.1.12. Diferentes métodos de secado.....	17
2.1.13. Higrómetros	22
2.1.14. Psicómetro	24
2.1.15. Estructura metálica.....	24
2.1.16. Cargas	25
2.1.17. Análisis estructural.....	25
2.2. Marco Referencial.....	26
2.2.1. Propiedades físicas y mecánicas de la madera de balsa	26
2.2.2. Los tablones de madera de balsa.....	27
2.2.3. Apilado de la madera.....	27
2.2.4. Características generales de diseño de una cámara de secado metálica.....	28
2.2.5. Distanciamiento entre la pila de madera y la cámara de secado.....	28
2.2.6. Consideraciones de diseño de una cámara de secado	28
2.2.7. Cargas de viento.....	29
2.2.8. Cargas sísmicas	31
2.2.9. Selección del programa de secado	33
2.2.10. Contenido de humedad en la madera.	33
2.2.11. Humedad específica del aire	34
2.2.12. Humedad relativa del aire.....	34

2.2.13. Carta psicrométrica	35
2.2.14. Etapa de calentamiento de la cámara de secado y la madera.....	35
2.2.15. Etapa de evaporación del agua en la madera.	36
2.2.16. Velocidad requerida del aire de acuerdo al tipo de madera.....	39
2.2.17. Acondicionamiento final	39
2.2.18. Enfriamiento	39
2.2.19. Curva de secado	40
2.2.20. Sistema de calefacción	40
2.2.21. Sistema de Ventilación.....	41
2.2.22. Ensayos mecánicos en la balsa	43
CAPÍTULO III.....	45
3.1 Localización	46
3.2. Tipos de investigación	46
3.2.1 Investigación Exploratoria.....	46
3.3. Métodos de Investigación	47
3.3.1. Método Inductivo.....	47
3.3.2. Método Analítico	47
3.3.3. Método Comparativo.....	47
3.4. Fuentes de recopilación de Información.....	47
3.5. Diseño de la Investigación	47
3.6. Instrumentos de Investigación.....	48
3.7. Recursos Humanos y Materiales	48
CAPÍTULO IV.....	49
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	49
4.1. Resultados	50
4.1.1. Análisis preliminar del diseño	50
4.1.2. Dimensionamiento de los tablonces de madera de balsa	50

4.1.3. Dimensiones de los espaciadores	50
4.1.4. Dimensiones de las pilas de madera.....	51
4.1.5. Estudio de criterios de ponderación	53
4.1.6. Dimensiones internas de la cámara de secado	58
4.1.7. Disposición de la cámara de secado	58
4.1.8. Materiales que compondrán las paredes, puertas y techado de la cámara de secado	59
4.1.9. Identificación de las cargas de diseño	61
4.1.10. Análisis de esfuerzos y deformaciones a la estructura de la cámara de secado.....	67
4.1.11. Parámetros de diseño.....	71
4.1.12. Desarrollo del programa de secado	73
4.1.13. Cálculos térmicos de la cámara de secado.....	74
4.1.14. Diseño del serpentín	103
4.1.15. Sistema de transmisión	112
4.1.16. Comparaciones de diseño propuesto vs diseño convencional	119
4.1.17. Costos del proyecto	120
CAPÍTULO V	124
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	124
5.1. Conclusiones	125
5.2. Recomendaciones	127
CAPÍTULO VI	129
BIBLIOGRAFÍA	129
CAPÍTULO VII	135
ANEXOS	135

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Etapas del proceso de secado artificial de madera en cámaras.	15
Tabla 2. <i>Espesor y distanciamiento de separadores de acuerdo a espesor de madera a secar.</i>	16
Tabla 3. Propiedades físicas de la madera de balsa.	26
Tabla 4. Propiedades mecánicas de la madera de balsa.	27
Tabla 5. Valores del coeficiente de exposición C_e	30
Tabla 6. Coeficiente eólico.....	31
Tabla 7. Corrección debido al espesor	38
Tabla 8. Factores de corrección para maderas coníferas.....	38
Tabla 9. Factor de corrección por velocidad de aire.	38
Tabla 10. Factor de corrección para maderas difíciles de secar.	38
Tabla 11. Factor de corrección por agua libre.	39
Tabla 12. Velocidades del aire requeridas según el tipo de madera	39
Tabla 13. Dimensiones estándar del tablón de madera de balsa.....	50
Tabla 14. Espesor y distanciamiento de separadores de acuerdo a espesor de madera a secar	51
Tabla 15. Matriz de comparación de criterios	53
Tabla 16. Alternativa de diseño 1	54
Tabla 17. Alternativa de diseño 2	55
Tabla 18. Evaluación del criterio consumo energético.	55
Tabla 19. Evaluación del criterio de pérdidas de calor	56
Tabla 20. Evaluación de criterio estructura segura.....	56
Tabla 21. Evaluación del criterio precio de construcción	57
Tabla 22. Evaluación de la prioridad de diseño.....	57
Tabla 23. Dimensiones de los materiales que componen las paredes de la cámara de secado.	60
Tabla 24. Volumen y cargas totales que presentan los materiales que componen las paredes de la cámara.....	61
Tabla 25. <i>Cargas muertas del techado de la cámara de secado</i>	62
Tabla 26. Cargas producidas por las puertas de la cámara de secado.....	62
Tabla 27. <i>Cargas vivas mínimas para cubiertas en kg/m²</i>	63

Tabla 28. <i>Cálculo de esbeltez según los planos paralelos al viento</i>	64
Tabla 29. Coeficientes eólicos requeridos en el cálculo de cargas de viento en las paredes y techado de la cámara de secado.	65
Tabla 30. Presiones estáticas del viento a la estructura de la cámara de secado en [N/m ²]	65
Tabla 31. Presiones estáticas del viento a la estructura de la cámara de secado en	66
Tabla 32. <i>Cargas aplicadas en la estructura.</i>	68
Tabla 33. Valores de los parámetros de la madera a considerar en el diseño de la cámara de secado	72
Tabla 34. Valores de los parámetros del aire que circula dentro de la cámara de secado ..	72
Tabla 35. Valores de las condiciones climáticas de Quevedo	72
Tabla 36. Programa de secado sugerido para la madera de balsa con un espesor de 2 in...73	73
Tabla 37. Programa de secado artificial para madera de balsa con espesor de 2in	73
Tabla 38. Flujos de calor de los materiales que componen las paredes de la cámara de secado.	83
Tabla 39. <i>Flujos de calor de los materiales que componen el techado de la cámara de secado.</i>	84
Tabla 40. <i>Flujos de calor para calentar los materiales que conforman las puertas de la cámara de secado</i>	85
Tabla 41. <i>Diagrama de resistencias de los materiales que componen las paredes.</i>	86
Tabla 42. Propiedades del aire a la presión de 1atm y una temperatura de 25 °C.....	87
Tabla 43. Propiedades del aire a la presión de 1atm y una temperatura de 53 °C.....	88
Tabla 44. Conductividad térmica de los materiales que conforman las paredes de la cámara de secado.	89
Tabla 45. Coeficientes de convección para las temperaturas de la capa límite en las superficies externas e internas.	92
Tabla 46. Resumen de parámetros en la pérdida de calor por parte de la pared 2.....	93
Tabla 47. Resumen de parámetros en la pérdida de calor por parte de la pared 3.....	94
Tabla 48. Resumen de parámetros en la pérdida de calor por parte del techo.	95
Tabla 49. Resumen de parámetros en la pérdida de calor por parte de las puertas.	96
Tabla 50. Masa de agua a sustraer de la madera de balsa	97
Tabla 51. Tiempos de secado básico (h) de acuerdo a los contenidos de humedad establecidos en el programa de secado.....	99

Tabla 52. Tiempos que requeridos para llegar de un porcentaje de contenido de humedad a otro y tiempos corregidos.....	100
Tabla 53. Flujos de calor necesario para extraer el agua libre y de constitución	102
Tabla 54. Flujos de calor requeridos en el proceso de secado de la madera de balsa.....	102
Tabla 55. Costos de Estructura.	121
Tabla 56. Costos de Sistema de Calefacción.....	122
Tabla 57. Costos de Equipo Auxiliar.....	122
Tabla 58. Costos de Diseño y Mano de obra.....	122
Tabla 59. Costos Totales	123

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Árbol de balsa.....	9
Ilustración 2. Interacciones existentes entre la madera y la atmósfera.....	10
Ilustración 3. Deformación en madera	14
Ilustración 4. Descoloramiento en madera	14
Ilustración 5. Ruptura en madera	15
Ilustración 6. Apilado de madera.	17
Ilustración 7. Una pila de madera con una base de bloques de concreto.	18
Ilustración 8. El cobertizo para secar la madera protege la madera de la intemperie.	19
Ilustración 9. Secado de madera en Cámaras convencionales	20
Ilustración 10. Esquema de horno solar de secado.....	20
Ilustración 11. Horno solar para secado de madera.....	21
Ilustración 12. Horno de deshumidificación.....	22
Ilustración 13. Higrómetro Resistivo.	23
Ilustración 14. Higrómetro.....	23
Ilustración 15. Psicrómetro, con ventilación del termómetro mojado, consistente en soporte completo para 2 termómetros y mecha humidificante.	24
Ilustración 16. Fases de un proyecto típico de ingeniería estructural.	26
Ilustración 17. Tablón de madera de balsa aserrada.....	27
Ilustración 18. Cortante basal V distribuido en la altura de la estructura.....	32
Ilustración 19. Esquema de una carta psicrométrica	35
Ilustración 20. Tiempo básico de secado de maderas coníferas.	37
Ilustración 21. Curva de secado	40
Ilustración 22. Sistema de calefacción de una cámara de secado	41
Ilustración 23. Velocidades del aire requeridas según el tipo de madera.....	39
Ilustración 24. Ventilación longitudinal en una cámara de secado de madera.	42
Ilustración 25. Ventilación transversal en un cámara de secado de madera.....	42
Ilustración 26. Dimensiones de probetas.	
Ilustración 27. Ensayo de tracción en probetas de madera de balsa.....	43
Ilustración 28. Dimensiones de probetas.....	
Ilustración 29. Ensayo de flexión en probetas de madera de balsa.....	44
Ilustración 30. Ubicación de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo.....	46

Ilustración 31. Dimensiones de la vista frontal del paquete de madera	51
Ilustración 32. Dimensiones de la vista lateral del paquete de madera	52
Ilustración 33. Dimensiones de las pilas de madera.....	52
Ilustración 34. Porcentajes para jerarquización de criterios	53
Ilustración 35. Dimensiones de la cámara de secado.	58
<i>Ilustración 36. Disposición de la estructura de la cámara de secado</i>	<i>59</i>
<i>Ilustración 37. Materiales que componen las paredes de la cámara.</i>	<i>60</i>
Ilustración 38. Representación de cargas de presión y succión	66
Ilustración 39. Distribución de cargas en la estructura de la cámara de secado	69
<i>Ilustración 40. Tensiones máximas presentes en la estructura</i>	<i>69</i>
Ilustración 41. Factor de seguridad que presenta la estructura de la cámara de secado	70
Ilustración 42. Deformaciones máximas presentadas por el diseño de la estructura	71
Ilustración 43. Flujos de calor necesarios para calentar la cámara de secado	74
Ilustración 44. Flujos de calor para evaporar el agua en la madera	75
Ilustración 45. Flujo de calor perdido en las paredes	75
Ilustración 46. Volumen de aire dentro de la cámara de secado.....	79
Ilustración 47. Distribución de flujos de calor para calentar la estructura	82
Ilustración 48. Tiempos básicos de secado en función del contenido de humedad en maderas blandas.....	98
Ilustración 49. Curva de tiempo de secado de madera de balsa con 2 in de espesor	101
Ilustración 50. Área transversal al flujo de aire forzado por ventiladores.....	103
Ilustración 51. Factor de corrección de flujo cruzado de un solo paso con los dos fluidos de flujo no mezclado.....	106
Ilustración 52. Diseño del serpentín.....	108
Ilustración 53. Curvas de caudal vs caída de presión.....	111
Ilustración 54. Potencia requerida del motor	111
Ilustración 55. Características del ventilador seleccionado	111
Ilustración 56. Factor de carga C2	113
Ilustración 57. Diagrama de correas trapeciales estrechas de alto rendimiento.....	114
Ilustración 58. Poleas acanaladas trapeciales.....	115
Ilustración 59. Desarrollo de referencia	116
Ilustración 60. Ajuste mínimo x/y de la distancia entre ejes.	117
Ilustración 61. Arco de brazo y factor de corrección.	117

Ilustración 62. Factor de desarrollo.....	118
Ilustración 63. Potencia Nominal por correa.	118
Ilustración 65. Flujo de calor en la etapa de calentamiento.....	119
Ilustración 66. Pérdidas de calor por parte de las paredes durante el proceso de secado de madera.....	120

CÓDIGO DUBLIN

Titulo: “Diseño y simulación de una cámara de secado para madera de balsa, mediante el análisis térmico y estructural para mejorar la eficiencia de secado.”

Autores: Diaz Coello Julio Sebastián, Garofalo Zambrano Julio Alberto

Palabras claves: Balsa Cámara de secado Secado de madera Análisis estructural Análisis térmico

Fecha de publicación:

Editorial: Quevedo, UTEQ, 2021

Resumen: Este proyecto de investigación tiene como finalidad el diseño y simulación de una cámara de secado para madera de balsa, para mejorar la eficiencia de secado, como también la determinación de las propiedades y características termo-físicas de la madera. Mediante el uso de criterios ponderados se seleccionó el diseño más adecuado, que consta de recubrimientos metálicos y lana de vidrio, ya que estos necesitan un menor flujo de calor para alcanzar la temperatura de operación y mayor resistencia a la conductividad térmica.

La cámara de secado se diseñó para secar $20,5 m^3$ de madera de balsa, con una altura de $4 m$, ancho de $4,45 m$, profundidad de $7,4 m$ y un ángulo de caída de 3° , este se lo realizó con la ayuda del software CAD SOLIDWORKS, además de aplicar un análisis de elementos finitos estructural, donde la mayor deformación que presenta la estructura es el techado alcanzando los $4 mm$ y un factor de seguridad mínimo de $n_{min} = 7,78$.

Mediante la determinación de los parámetros de diseño para la selección de los componentes del sistema calefactor y de ventilación, se seleccionó dos serpentines que cuenta con 22 tubos de una pulgada de diámetro nominal y 2 metros de largo, se requiere un ventilador de tipo axial de seis palas con un diámetro de hélice de $1,25 m$. Con la determinación del programa de secado, se realizó la comparación de una cámara de secado convencional y el diseño estudiado, el cual presentó una disminución de pérdidas de calor por las paredes, con una eficiencia de 3 a 1, pero obteniendo un mismo tiempo de secado de aproximante $155,9 h$ (7 días aproximante), para alcanzar un porcentaje de humedad del 12 %.

Abstract: The purpose of this research project was the design and simulation of a drying chamber for balsa wood to improve the drying efficiency, jointly with the determination of the properties and thermo-physical characteristics of the wood. By using weighted criteria, the most suitable design was selected, which consists of metallic coatings and glass wool, since these require less heat flow to reach operating temperatures and greater resistance to thermal conductivity.

The drying chamber was designed to dry $20,5 \text{ m}^3$ of balsa wood, with a height of 4 m , width of $4,45 \text{ m}$, a depth of $7,4 \text{ m}$ and a fall angle of 3° . This was done with the help of SOLIDWORKS CAD software, in addition to applying a structural finite element analysis, where the greatest deformation of the structure is the roof, reaching 4 mm and a minimum safety factor of $n_{min} = 7,78$.

By determining the design parameters for the selection of the components of the heating and ventilation system, two coils were selected that have 22 tubes of one inch in nominal diameter and 2 meters long, an axial type fan of six blades with a propeller diameter of 1.25 m . With the determination of the drying program, the comparison of a conventional drying chamber and the studied design was carried out, which showed a reduction in heat losses through the walls, with an efficiency of 3 to 1, but obtaining the same time of drying for approximately $155,9 \text{ h}$ (around 7 days), to reach a humidity percentage of 12%.

Descripción 172 hojas: Dimensiones 29 x 21 cm: CD-ROM

URI

INTRODUCCIÓN

Ochroma pyramidale Cav., comúnmente conocida como balsa, es una especie nativa de bosques húmedos tropicales con origen en América Central, zonas del Caribe, las Antillas y América del Sur. Es un árbol de crecimiento rápido de entre cuatro y seis años que alcanza alturas entre 18 a 24 metros y diámetros de 30 a 45 cm a la altura del pecho. Es reconocido a nivel mundial por su baja densidad y gran resistencia mecánica, utilizado para la elaboración de artesanías, maquetas, equipos acústicos, material aislante en aviones, construcción de aspas para molinos de viento, entre otras. Los países más importantes productores de balsa son Ecuador, Colombia, Perú, Brasil, Bolivia, Papúa Nueva Guinea y Ghana.

En Ecuador las provincias de Guayas, El Oro, Los Ríos y Santo Domingo, producen bienes elaborados a partir de la balsa, ocupando el vigésimo lugar del ranking nacional; luego del banano, camarón, rosas, aceite de palma y otros. Ecuador es considerado el mayor productor de balsa, abarcando el 95 % de la producción mundial, debido a que la madera cumple los estándares solicitados por los mercados del Asia, Europa y América del Norte, los cuales adquieren el 90 % de la producción, ya que en Ecuador solo se utiliza un 10 % para elaborar artesanías y construcción de interiores.

El proceso de secado de la madera se puede realizar al aire libre o dentro de cámaras. Al utilizar el primer método, la madera no llega a los porcentajes de humedad requeridos (12 % a 10 %), esto hace que la industria construya cámaras de secado que utilizan técnicas como: decantación, destilación, expulsión por medio de presión o conductividad eléctrica para eliminar el exceso de agua. Estos procedimientos, en función del volumen a secar, requieren diferentes valores específicos del flujo de calor en cada etapa del secado de la madera para que el producto final presente el menor número de defectos o fallas.

Las cámaras de secado de madera convencionales son comúnmente construidas en materiales de bajo costo como ladrillos refractarios y mortero, con el estudio se pretende identificar, las ventajas que presenta la construcción de una cámara con materiales que tienen un mejor comportamiento termodinámico, analizando las etapas de secado y requerimientos de calor exigidos por la madera para lograr alcanzar el porcentaje de humedad deseado.

Por otra parte, la cámara de secado debe ser segura y contar con dimensionamientos ya establecidos en investigaciones previas, donde se determinan espacios entre paredes y la pila de madera, número y dimensiones de separadores y las dimensiones máximas que puede tener una pila de madera. Considerando elaborar un diseño estructural que soporte las diferentes cargas producidas por fenómenos naturales y de peso propio, que deberá soportar a lo largo de su vida útil.

CAPÍTULO I
CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Problema de la investigación

1.1.1. Planteamiento del problema

La balsa es una madera muy apreciada en el mercado internacional, debido a su baja densidad y gran resistencia, lo que la convierte en un material fundamental en construcción de componentes de aviones y aerogeneradores, esto provoca que países que promueven la generación de energías verdes tengan una gran demanda de consumo. Existen varios países productores de balsa en el continente sudamericano y africano. De ellos se destaca la balsa ecuatoriana, puesto que cumple con creces los estándares de calidad requeridos, tales como: densidad correcta, corazón sin agua, además, de cero putrefacción, hongos y plagas de insectos.

Las empresas dedicadas a la exportación de madera balsa y sus derivados optan por secarla en cámaras, por sus múltiples ventajas frente al secado natural (aire libre). Debido que dentro de una cámara de secado se controla de manera precisa parámetros críticos como, humedad, el flujo de aire y temperatura.

Reducir la humedad de este producto de 200 % en comparación a la base seca (niveles máximos) hasta un 15 % o 10 %, no solo reduce su peso, también previene la formación de hongos, mejora características físicas y mecánicas; incluso facilita su comercialización. El proceso de secado es fundamental para obtener el menor número de defectos posibles en la madera y de esta manera no reducir el precio del producto.

Las características presentadas de la madera de balsa en el Ecuador son las mejores, lo que convierte al país en el principal exportador, despertando el interés de grandes empresas internacionales, las cuales se han afincado e invertido en el estudio, cultivo y procesamiento de la madera balsa. Dentro de este último punto, se encuentra el proceso de secado, que en su mayoría se lleva a cabo en cámaras con diseños artesanales construidas comúnmente con hormigón o bloque.

El sistema de calefacción lo conforman los serpentines que, junto a los ventiladores, crean un flujo de aire caliente que sigue una trayectoria recta y se va hacia el exterior por los difusores, sin ser aprovechado correctamente en todo el volumen de la cámara para el proceso de capilaridad que requiere la madera balsa al ser secada. Este conjunto de

problemas térmicos hace que la generación de calor para reducir la humedad en la balsa sea muy grande, provocando poca rentabilidad en las medianas y pequeñas industrias.

Desde el punto de vista estructural, las cámaras presentan inconvenientes importantes como: escasez de dimensionamiento en las bases de la estructura, columnas sobre dimensionadas, pandeo excesivo en vigas de pared y techo, entre otros. Este tipo de estructura presenta un alto grado de inseguridad para el personal que labora en estas áreas.

En la actualidad las cámaras de secado para madera de balsa en el Ecuador requieren mejoras de diseño para mejorar la eficiencia térmica, debido a que son construidas comúnmente con materiales como: ladrillo y hormigón, que, a pesar de tener una alta resistencia a la conducción térmica, requieren un mayor tiempo para llegar a las temperaturas de operación y por ende un mayor consumo de energía térmica.

1.1.2. Formulación del problema

¿Se puede tener un mejor aprovechamiento del flujo de calor distribuido a la madera de balsa dentro de una cámara de secado, con un diseño de estructura metálica?

1.1.3. Sistematización del problema

¿Cuáles son las principales características y propiedades de la madera de balsa?

¿Qué tipo de diseño de la cámara será adecuado para aprovechar de mejor forma el flujo de calor distribuido al volumen de madera de balsa?

¿Qué dimensiones requieren los sistemas de ventilación y calefacción de la cámara de secado, para un determinado volumen de madera de balsa?

¿Qué garantizará que el diseño de la estructura de la cámara de secado sea óptimo y seguro?

¿Cómo identificar los flujos de calor requeridos en el proceso de secado de la madera de balsa?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Diseñar y simular una cámara de secado de madera de balsa mediante el análisis térmico y estructural, para mejorar la eficiencia de secado.

1.2.2. Objetivos Específicos

- ❖ Identificar las características y las propiedades termo-físicas de la madera de balsa, requeridas para realizar el proceso de secado artificial en cámaras.
- ❖ Diseñar una cámara con paredes angulares para la generación de turbulencia al aire caliente, distribuido para conseguir un secado uniforme al volumen de la madera de balsa.
- ❖ Seleccionar los componentes del sistema calefactor y sistema de ventilación de la cámara de secado.
- ❖ Analizar el comportamiento termodinámico de la madera al secar, obteniendo la curva humedad – tiempo y la disposición adecuada de la cámara.
- ❖ Análisis estructural de la cámara de secado, utilizando el método de elementos finitos, para obtención del dimensionamiento óptimo de la estructura y garantías de seguridad.
- ❖ Comparar los resultados obtenidos del diseño propuesto, versus el diseño convencional de cámaras de secado para madera de balsa.

1.3. Justificación

La balsa es una madera blanda que presenta una gran cotización en el mercado internacional, esto se debe a su excelente relación entre peso y resistencia. Sin embargo, al momento de ser cortada, presenta un alto contenido de agua, para conocer el flujo de calor requerido por la madera de balsa se necesita conocer propiedades como: su densidad y el calor específico de acuerdo al contenido de humedad que está presente.

El diseño de la cámara de secado debe ser acorde a los volúmenes de las pequeñas y medianas empresas, el proceso de secado está formado por fases que requieren un consumo energético en los cuales se requiere alcanzar un balance entre los materiales que componen la cámara, el ambiente dentro de la cámara y la madera de balsa. Por lo general, medias y pequeñas empresas dedicadas a esta labor, optan por diseñar cámara de secado a base de ladrillos y hormigón, por ser materiales más económicos; pero estos requieren un mayor consumo de energía, el cual en la mayoría de los casos es a partir de la quema de los residuos de la misma madera de balsa, contaminando más el entorno. La madera blanda suele tener un tiempo de secado corto, variando de acuerdo a factores como espesor o la velocidad del flujo de aire caliente. Mediante la selección de programas de secado, es recomendable elaborar una curva de secado, para que los operarios tengan una referencia de cuando aumentar o disminuir el flujo de calor o tomar muestra de madera para comparar el contenido de humedad con los de la curva.

Teniendo como fin la comparación del consumo de calor que se requiere en la etapa de calentamiento, y comparar el tiempo de secado estimado en cálculos con el de cámaras ya en funcionamiento, ya que la prioridad es que el sector productivo disminuya en consumo energético, evitando la generación de defectos en el producto ya procesado.

CAPÍTULO II
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. Marco conceptual

2.1.1. Balsa

Ochroma pyramidale Cav., conocido usualmente como balsa, guano, corcho, lana, es un árbol de vasta repartición que invade terrenos recién perturbados. Esta especie de crecimiento veloz crea una madera de bastante baja densidad, su densidad varía dentro del rango de 40 – 380 kg/m³, dependiendo de la edad y hábitat del árbol, tiene un peso muy ligero, por lo que, tiene varios usos como: aislamiento térmico, absorción de sonido, aplicaciones de flotabilidad, catalizador de núcleo en paneles de arena y para la fabricación de modelos. [1]

Ilustración 1. Árbol de balsa.



Fuente: [1]

2.1.2. Humedad en la madera

La madera alberga en su interior gran cantidad de agua, que varía dependiendo la especie, y puede contener desde la mitad hasta el doble con respecto al peso en seco. Es un material higroscópico que puede receptor o ceder agua, debido a factores como: temperatura y humedad relativa del ambiente que se encuentre. En la madera, el agua se puede presenciar de dos formas: agua libre o capilar y agua de impregnación. [2]

2.1.2.1. Agua libre o capilar

La extracción total del agua libre provoca que la madera llegue a un 30 % de humedad en la madera, lo cual se conoce como punto de saturación de las fibras, hasta aquí la madera no presenta cambios en sus propiedades físicas y mecánicas. [3]

2.1.2.2. Agua de impregnación

El agua de impregnación se encuentra adherida a las paredes celulares, para expulsarla se requiere de energía, la cual puede provocar hinchazón o mema a la madera, y solo puede ser eliminada en hornos o cámaras de secado. [3]

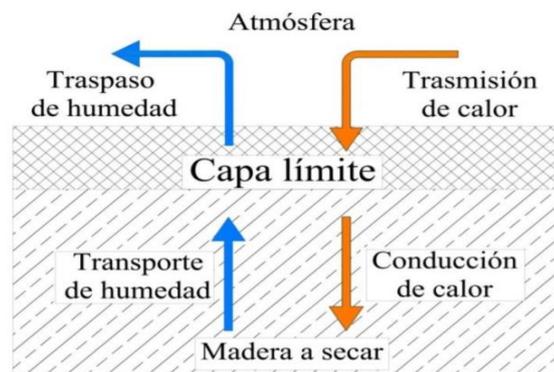
2.1.3. Punto de saturación de las fibras

El punto de saturación de las fibras, es cuando la madera presenta sus cavidades celulares sin agua, pero las paredes celulares están completamente saturadas de líquido. [4]

2.1.4. Capa límite de la madera

Zona de la madera en contacto con la atmósfera que permite realizar dos procesos simultáneos durante el secado, transmitir calor hacia el interior de la madera para facilitar su evaporación y transportar la humedad hacia el exterior de la madera. [5]

Ilustración 2. Interacciones existentes entre la madera y la atmósfera.



Fuente: [5]

2.1.5. Migración de fluidos en la madera

Las diferencias en el comportamiento de secado entre las especies dentro del tronco provienen principalmente del valor de permeabilidad y de la saturación de humedad inicial. Los árboles de madera blanda, por lo general son menos permeables, ya que no poseen elementos especializados para el flujo de la sabia, mientras que las maderas duras y especies de poros anulares son más permeables, ya que cuentan con gran cantidad de poros de mayor diámetro. [6]

2.1.6. Secado de la madera

La ventaja de secar la madera radica en sus bajos costos de manipulación y transportación, debido a que la extracción de agua reduce considerablemente su peso, la mayor parte de las propiedades de resistencia aumentan, mejora su capacidad de aislación térmica y eléctrica, fácil de mecanizar, ya se puede cortar a dimensiones y se pueden montar o sujetar de manera más segura con clavos, tornillos, entre otros.

La aplicación eficaz de humedad relativa, circulación de aire y temperatura son fundamentales para obtener un eficiente secado de la madera gracias al control del proceso. Puesto que el no control del proceso, conlleva a defectos de secado que afectan la economía del producto. La madera se debe secar tan rápido como lo permitan factores como las especies en particular, grosor y requisitos del producto final sin dañar la madera, ya que un secado lento puede ser antieconómico. [7]

2.1.7. Parámetros influyentes en el secado de la madera

Existen tres parámetros ambientales que controlan la tasa de secado de la madera, estos son:

- Humedad relativa (bulbo húmedo o EMC)
- Temperatura (bulbo seco)
- Velocidad.

La buena manipulación de estos parámetros determinará la efectividad del proceso de secado y la calidad de la madera. [8]

2.1.7.1. Temperatura

Si la temperatura aumenta, ocurren cinco cambios que afectan el secado:

- El agua se mueve más rápido en la madera en altas temperaturas.
- El secado es más uniforme en madera en altas temperaturas.
- La humedad relativa del aire disminuirá, a menos que se agregue agua al aire.
- La madera es más débil en altas temperaturas.
- La deformación suele ser peor en altas temperaturas. (excepto en el secado a alta temperatura - más de 212 ° F). [8]

2.1.7.2. Humedad relativa

A medida que disminuye la humedad relativa, ocurren cinco cambios que afectan el secado:

- El agua se mueve más rápido a medida que baja la humedad.
- El secado es más uniforme a humedades bajas.
- La deformación es menor en humedades bajas.
- La comprobación es más probable en humedades más bajas.
- Es menos probable que se produzcan manchas a medida que disminuye la humedad.

Existen maderas que requieren humedades altas, por lo cual se debe manejar con precaución, puesto que, en especies que probablemente se agrieten durante el secado, la humedad debe ser bastante alta, pero no demasiado alta, para que el riesgo de manchas y deformaciones no sobre pasen por encima de los niveles tolerables. Para las especies que pueden tolerar humedades más bajas, estas humedades bajas deben usarse para proporcionar madera más brillante y plana, y un secado más rápido. [8]

2.1.7.3. Velocidad de secado.

A medida que aumenta la velocidad de secado a través de una carga de madera, ocurren varios cambios que afectan el secado:

- Por encima del 40 % del contenido de humedad, la madera se seca más rápido a medida que aumenta la velocidad.
- Por debajo del 20 % del contenido de humedad, la madera no se secará más rápido

a medida que aumenta la velocidad.

- Entre el 40 % y el 20 % del contenido de humedad, el efecto de los aumentos de velocidad disminuye.
- A velocidades más altas, el secado es más uniforme.

Un secado más rápido aumenta el riesgo de agrietamiento, pero disminuye el riesgo de manchas y deformaciones. Velocidades de secado inferiores al 20 % pueden generar ahorros de costos muy significativos. [8]

2.1.8. Defectos de secado en la madera

Los defectos de secado son imperfecciones en la madera que ocurren durante el proceso de secado, afectando el precio de comercialización del producto. La degradación por secado es un término más específico que implica un defecto de secado que reduce la calidad de la madera. Cuando aparecen defectos inesperados en los productos de madera seca, su causa suele atribuirse a la operación de secado. Estos defectos en la madera se desarrollan durante la tala, el aserrado, el secado, el acabado, y la manipulación mecánica. Las empresas requieren que la madera presente la menor cantidad de defectos posibles durante el secado para obtener buenos resultados económicos. [9]

2.1.9. Categorías de defectos

La mayoría de los defectos o problemas que se desarrollan en los productos de madera durante y después del secado se pueden clasificar en las siguientes categorías:

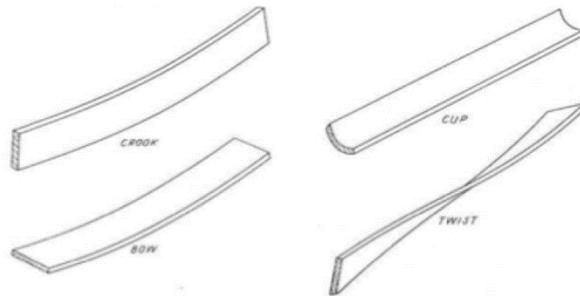
- Rotura de tejido de madera
- Deformación
- Contenido de humedad desigual
- Decoloración

Los defectos en cualquiera de estas categorías son causados por una interacción de las propiedades de la madera con factores de procesamiento. [9]

2.1.9.1. Deformación

La deformación en la madera, es cualquier desviación de la cara o borde de un tablero de la planitud o cualquier borde que no esté en ángulo recto con la cara o borde adyacente. [10]

Ilustración 3. Deformación en madera



Fuente: [10]

2.1.9.2. Descoloramiento

La decoloración afecta el uso de productos de madera seca, particularmente cuando el uso final requiere un acabado claro y natural. [10]

Ilustración 4. Descoloramiento en madera



Fuente: [10]

2.1.9.3. Fractura o distorsión

Las fracturas de la superficie ocurren al principio del secado cuando la cáscara de la tabla está sometida a una tensión, lo suficiente como para fracturar la madera. [10]

Ilustración 5. Ruptura en madera



Fuente: [10]

2.1.10. Etapas del proceso secado

El secado artificial de la madera comprende de las siguientes etapas:

Tabla 1. Etapas del proceso de secado artificial de madera en cámaras.

Etapa del proceso	Objetivo que se persigue en cada etapa
Etapa de calentamiento	<ol style="list-style-type: none">1. Alcanzar las condiciones de temperatura y humedad relativa (HR) del aire dentro de la cámara.2. Igualar la temperatura y el contenido de humedad inicial en la carga de madera,
Etapa de secado	<ol style="list-style-type: none">1. Alcanzar el CH final establecido en el menor tiempo posible.2. Obtener CH final homogéneo en toda la carga y menor cantidades de defectos.
Etapa de post-secado	<ol style="list-style-type: none">1. Igualación: el objetivo es homogenizar el CH de todas las tablas que componen la carga. El CHE deberá ser igual al CH de la tabla más seca.2. Acondicionamiento: tiene doble objetivo, reducir o eliminar las tensiones de secado entre la superficie y el interior de la pieza y homogenizar el CH en el espesor de la pieza.3. Enfriamiento: una vez finalizado el secado y realizados los tratamientos anteriores, es conveniente enfriar la madera dentro de la cámara para evitar el riesgo de restablecimiento de las tensiones de secado.

Fuente: [11]

2.1.11. Aspectos prácticos para el secado de la madera

Los aspectos prácticos que hay que tomar en cuenta para el proceso de secado de la madera, son:

- Especie
- Espesor
- Ancho
- Longitud
- CH
- Calidad [11]

2.1.11.1. Separadores

Los separadores son listones de madera en la mayoría de los casos de parte transversal cuadrada, que alineados vertical (altura de pila) y horizontalmente (distancia entre separadores) se usan para dividir hileras o camas de madera aserrada, haciendo más fácil de esta forma la circulación de aire por medio de la pila. Tienen que fabricarse con madera independiente de deficiencias y seca (CH = 10-15 %). [11]

Tabla 2. *Espesor y distanciamiento de separadores de acuerdo a espesor de madera a secar.*

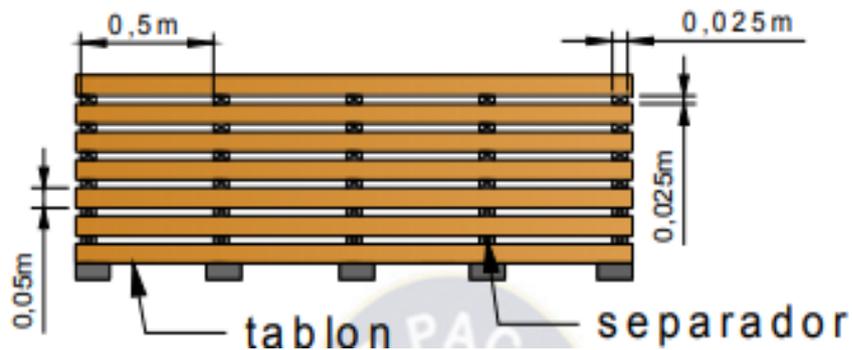
Espesor madera [mm]	Espesor separador [mm]	Distancia entre separadores [mm]
<20	20-30	300-400
20-25	20-30	400-500
25-40	20-30	500-600
40-65	30-40	700-800
65-80	40	900
>80	45	1000

Fuente: [11]

2.1.11.2. Apilado

Secar homogéneamente depende de la uniformidad del aire, pasando por la pila de madera, siendo de suma importancia un adecuado apilado en forma horizontal, es el sistema clásico en el secado usual. [12]

Ilustración 6. Apilado de madera.



Fuente: [12]

2.1.12. Diferentes métodos de secado

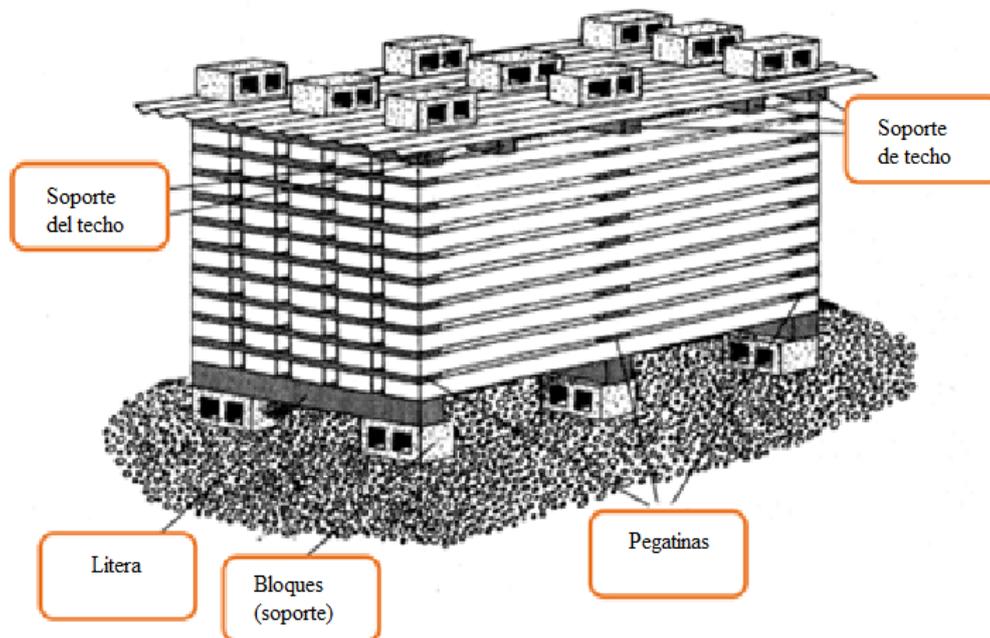
2.1.12.1. Secado al aire

Secar al aire significa apilar madera y exponerla al aire libre. El contenido de humedad final está determinado por la temperatura del aire, humedad relativa y tiempo de secado. Dependiendo de las condiciones externas y las especies y el tamaño de la madera, el secado al aire a un contenido de humedad deseado puede tomar de varios meses a casi un año.

Al secar madera al aire, debe apilar la madera correctamente para asegurar la circulación de aire adecuado. El secado al aire de la madera, comienza como tan pronto se corte el árbol. [13]

El secado al aire reduce aún más la posibilidad de que se desarrollen moho y descomposición durante el transporte, el almacenamiento o el uso posterior. Los hongos que destruyen la madera y las manchas azules no pueden crecer en madera con un contenido de humedad del 20% o menos. Sin embargo, es posible que la madera verde tenga que tratarse con un fungicida para protegerla de estos hongos en las primeras etapas del proceso de secado al aire. [14]

Ilustración 7. Una pila de madera con una base de bloques de concreto.



Fuente: [14]

2.1.12.2. Secado con cubierta

En el secado de cobertizos, la madera se coloca en un cobertizo sin paredes, evitando así la luz solar directa y la lluvia, al tiempo que permite un buen flujo de aire. Las tasas de secado se pueden regular mediante el uso de cortinas de malla de plástico y cerrándose durante el clima cálido y seco mientras se abren durante el clima frío o húmedo. El contenido de humedad final de la madera aserrada que utiliza este método suele ser superior al 20 % de contenido de humedad.

Los ventiladores también se pueden usar para forzar el aire a través de la madera en lugar de depender del viento natural. [15]

Ilustración 8. El cobertizo para secar la madera protege la madera de la intemperie.



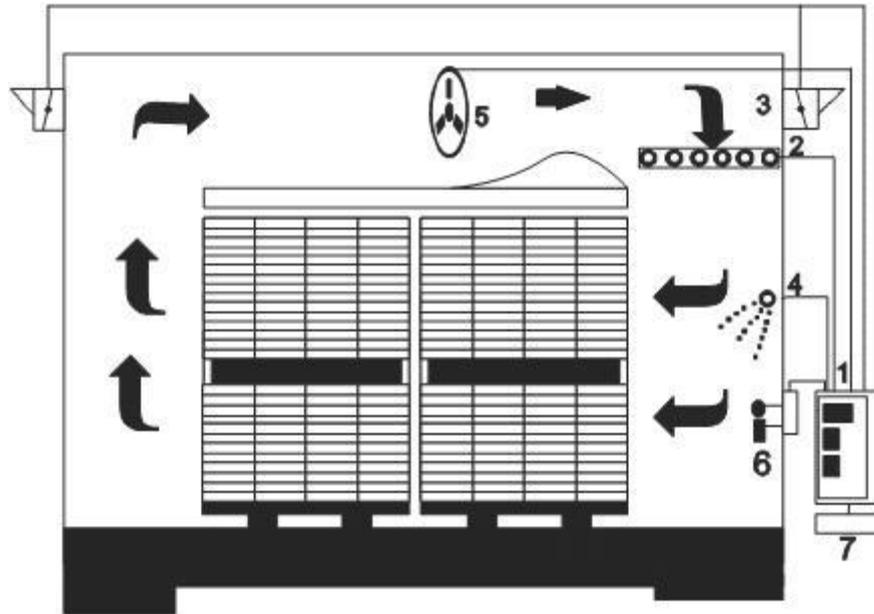
Fuente: [15]

2.1.12.3. Cámara de secado convencional

Existen varios tipos de cámaras de secado que se diferencian debido a la forma en que controlan la temperatura y humedad, proporcionando un secado lo más rápido posible que pueda tolerar un tipo de madera sin que esta aumente sus defectos en el proceso.

Su funcionamiento radica en forzar la circulación de aire por medio de sistemas de ventilación, calefacción y humidificación, que pasa por medio de la pila de madera. El proceso consiste en la circulación de aire por la madera, donde la madera absorbe el calor y expulsa humedad al ambiente de la cámara. El aire después de brindar su poder calorífico a la madera disminuye su temperatura y aumenta su humedad, los ventiladores fuerzan a salir este aire por las ventilas y al mismo tiempo siguen generando aire caliente para proseguir con el proceso de secado. [16]

Ilustración 9. Secado de madera en Cámaras convencionales

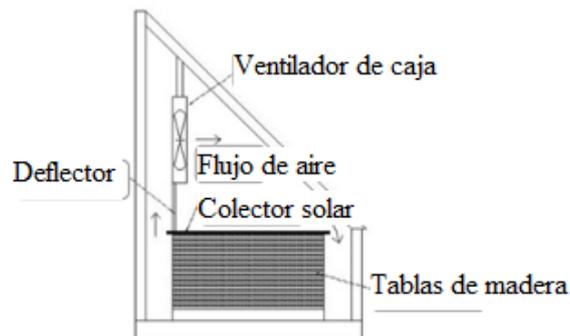


Fuente: [17]

2.1.12.4. Horno solar de secado

Los hornos solares generalmente dependen de algún tipo de colector solar para proporcionar la energía térmica que evapora el agua en la madera. Los tiempos de secado en un horno solar dependen del clima y, por lo tanto, son impredecibles. En climas cálidos pueden degradar la madera debido a un secado excesivo, mientras que en climas fríos pueden ser lentos y poco fiables.

Ilustración 10. Esquema de horno solar de secado.



Fuente: [18]

El horno se calienta cuando la energía solar ingresa al acristalamiento transparente y es absorbido por el interior pintado de negro las superficies. El aire del colector es calentado por la energía solar y circula a través de la pila de madera gracias a ventiladores. La humedad en la superficie de la madera es absorbida por el aire. Cuando la humedad evaporada incrementa la humedad relativa del aire, se procede a expulsar este aire a través de rejillas de ventilación en la puerta trasera de la cámara, a su vez las ventilas permiten el ingreso de aire seco a la cámara de secado. [18]

Ilustración 11. Horno solar para secado de madera.

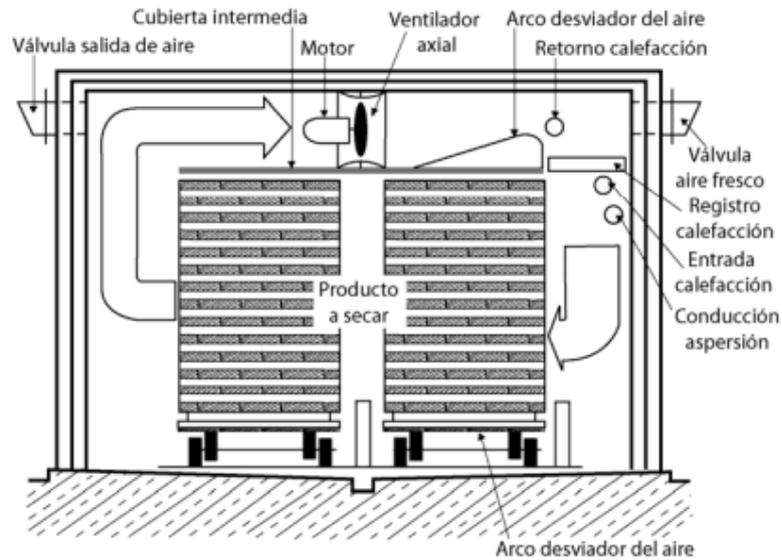


Fuente: [18]

2.1.12.5. Horno de des-humidificación

Este tipo de hornos utilizan un sistema de bomba de calor con el propósito de eliminar el agua dentro de la madera. Este sistema tiene la ventaja de reciclar el calor de forma continua sin tener que expulsar el aire caliente, como sucede en los secadores convencionales, haciéndolos más eficientes energéticamente y de menor costo de operación. Un sistema de des-humificación es más económico funcionalmente que un secador convencional debido a la conservación de energía mediante el reciclaje del calor, haciendo que la demanda de electricidad sea limitada. [19]

Ilustración 12. Horno de deshumidificación.



Fuente: [19]

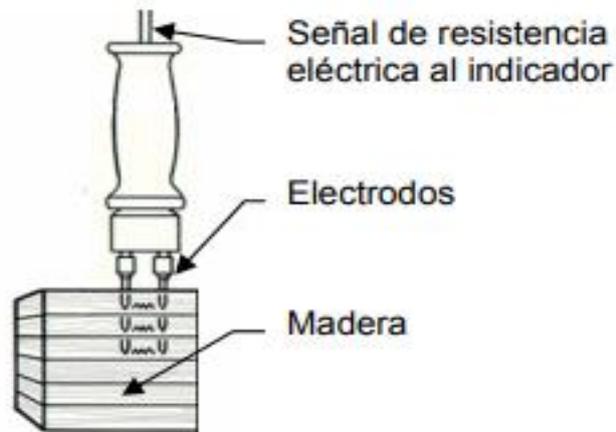
2.1.13. Higrómetros

El Termo higrómetro o higrómetro, es un instrumento disponible que mide especialmente la humedad del aire o cualquier otro gas. Con el pasar del tiempo y el perfeccionamiento del termo higrómetro en la actualidad, este puede medir otros aspectos como la temperatura del aire. [20]

2.1.13.1. Higrómetros Resistivos

Su inicio de operación se fundamenta en que la madera seca es pobre conductora de electricidad. El agua, al absorberse en la madera y combinarse con las resinas propias de la madera, optimización su conductividad eléctrica, debido al flujo iónico al ejercer tensión en corriente continua por medio de los electrodos, de esta forma la resistencia medida (o conductancia, la cual es inversa a la resistencia) a un flujo de la corriente por medio de la madera es una medida de la proporción de humedad en dicha madera. [20]

Ilustración 13. Higrómetro Resistivo.



Fuente: [20]

2.1.13.2. Higrómetros Capacitivos

Los medidores que usan las características dieléctricas de la madera son los de tipo capacitivo. La proporción de energía absorbida es dependiente del contenido de humedad en la madera y convertida a lecturas de contenido de humedad. En esta clase de medidores la temperatura apenas influye en la medición del contenido de humedad en equilibrio. [20]

Ilustración 14. Higrómetro capacitivo



Fuente: [20]

2.1.14. Psicómetro

Sirve esencialmente para dictaminar HR en una cámara de secado. Este instrumento se apoya en 2 termómetros de mercurio equivalentes, el depósito de uno de los cuales denominado “termómetro mojado” está enroscado en una vaina de tela fina que puede humedecer, mientras tanto que el otro, denominado “termómetro seco” queda al descubierto. El termómetro seco apunta la temperatura de hoy del aire, en lo que el termómetro está mojado, a efecto del enfriamiento gracias a la evaporación, llega a una temperatura tanto más baja cuanto más seco está el aire ambiente. [21]

Ilustración 15. Psicrómetro, con ventilación del termómetro mojado, consistente en soporte completo para 2 termómetros y mecha humidificante.



Fuente: [21]

2.1.15. Estructura metálica

Una estructura se denomina metálica cuando la mayoría de las partes que la componen son elementos metálicos (generalmente de acero). Las estructuras metálicas son utilizadas generalmente en el área industrial por su gran funcionalidad y su bajo coste de producción. Por lo general, la mayoría de los proyectos ingenieriles o arquitectónicos se utiliza la estructura metálica. [22]

2.1.16. Cargas

El diseño de la estructura depende de identificar y determinar las cargas que soporta la estructura en su vida útil. Estas cargas nominales deben ser especificadas por reglamentos o como establezcan las condiciones involucradas en el diseño de la estructura. [23]

2.1.16.1. Cargas muertas

Las cargas muertas son magnitudes constantes que están fijas en un sitio. Son el peso propio de la estructura y las cargas ensambladas a esta. Es decir, muros pisos, techos, plomería y otros más. Las dimensiones y pesos deben ser estimados para la elaboración del análisis estructural, siendo este determinante para la selección precisa de las cargas y los elementos estructurales. [23]

2.1.16.2. Cargas vivas

Las cargas vivas pueden variar su ubicación y magnitud, son causadas por uso, ocupación o mantenimiento. Estas se dividen en cargas que se pueden mover por su propia cuenta como vehículos o gente y las cargas que deben o pueden ser movidas por otras fuentes. [23]

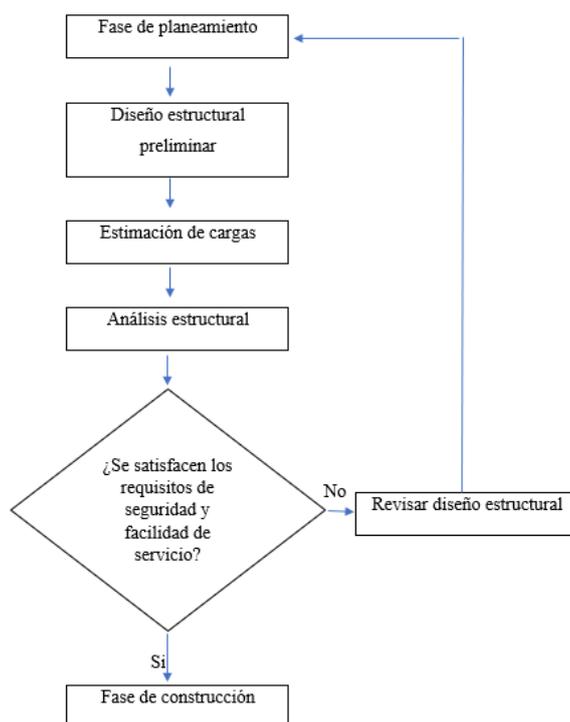
2.1.16.3. Cargas ambientales

Son cargas producidas por el medio ambiente donde se localiza alguna estructura en particular. La lluvia, nieve, viento, cambios de temperatura y sismos, son las cargas ambientales las que se podría decir que son cargas vivas, pero estas dependen de la zona donde se establece una estructura. [23]

2.1.17. Análisis estructural

El análisis estructural implica la predicción del desempeño de una estructura dada bajo cargas prescritas y otros efectos externos, como movimientos de soporte y cambios de temperatura. El propósito fundamental de un análisis estructural es determinar las magnitudes de fuerza y desplazamiento para cada elemento de un sistema de diseño para un conjunto dado de cargas de diseño. La fuerza se utiliza para representar tensiones o resultantes de tensiones, fuerzas axiales, fuerzas cortantes, momentos flectores y momentos de torsión junto con sus asociados. [24]

Ilustración 16. Fases de un proyecto típico de ingeniería estructural.



Fuente: [24]

2.2. Marco Referencial

2.2.1. Propiedades físicas y mecánicas de la madera de balsa

La propiedad más destacada que posee la madera de balsa en la relación de su liviano peso con una resistencia alta. [25]

Tabla 3. Propiedades físicas de la madera de balsa.

	Verde	Seco al aire	Básica
Densidad (g/cm ³)	0,34	0,16	0,12
	Tangencial	Radial	Radiación T/R
Contracción normal (%)	4,27	1,69	2,56

Fuente: [25]

Tabla 4. *Propiedades mecánicas de la madera de balsa.*

	Flexión Estática	Compresión paralela	Flexión Estática
Límite proporcional ELP	120,7 Kg/cm ²	101,5 Kg/cm ²	8,5 Kg/cm ²
Módulo de ruptura MOR	213,5 Kg/cm ²	133,7 Kg/cm ²	
Módulo de elasticidad MOE	43,7 Ton/cm ²	53,7 Ton/cm ²	1,75 Ton/cm ²

Fuente: [25]

2.2.2. Los tablones de madera de balsa.

Los tablones de madera de balsa presentan varias dimensiones, el tamaño más grande que estos pueden llegar a tener es de 150 mm por 100 mm por 3 m de largo. Su densidad puede variar de los 64 Kg/m³ hasta 320 Kg/m³. [26]

Ilustración 17. *Tablón de madera de balsa aserrada.*



Fuente: [27]

2.2.3. Apilado de la madera

Las pilas de madera dependen del tamaño de la cámara de secado y de la distribución de las pilas. Las pilas deben estar formadas de paquetes de dimensiones de fácil manejo. Los paquetes cuentan con dimensiones estándar de 2,5 m de profundidad 1,1m de ancho 1,1m de alto. Estos pueden formar pilas que no sobrepasen cinco paquetes de profundidad y cuatro paquetes de alto.

Los paquetes forman las pilas de tal manera que no sobrepasen cuatro paquetes de altura y cinco paquetes de profundidad. Con el propósito de obtener un paso de aire similar a la entrada y salida de las pilas. [28]

2.2.4. Características generales de diseño de una cámara de secado metálica.

Las cámaras deben ser herméticas, contar con una estructura resistente y formada de paneles con materiales que proporcionen una buena aislación térmica, por lo general los paneles de cámaras deben ser de chapas galvanizadas o de aluminio, ya que estos materiales presentan una mejor resistencia a la corrosión.

El arreglo de los paneles depende de la temperatura de operación, ya que la resistencia térmica es diferente según el caso, por ende, este arreglo requiere una capa de material aislante que puede ser de 60 mm a 120 mm. [29]

2.2.5. Distanciamiento entre la pila de madera y la cámara de secado.

La pila de madera debe tener una separación de 0,6 m a 1,4 m con respecto a las paredes de la cámara de secado, para que los operadores tengan libertad de tránsito y exista un buen flujo de aire. A su vez, el techado debe ser 0,5 m más alto que la pila de madera, para poder apilar con mayor facilidad. [30]

2.2.6. Consideraciones de diseño de una cámara de secado

Para el diseño de las cámaras de secado se debe tener en cuenta algunos criterios:

- **Dimensiones de la cámara:** la cámara de secado debe dimensionarse para que pueda acomodar fácilmente el rango esperado de tamaños de madera que se secarán e incluye un amplio espacio pleno para asegurar un flujo de aire uniforme durante el secado.
- **Altura:** la cámara de secado puede tener cualquier altura, pero se obtendrán mejores resultados, si la madera se apila al menos a 2.5 metros de altura. La razón de esto es que cuanto más peso lleve una tabla, las tablas apiladas sobre ella, más plana será la tabla después del secado.

- **Ancho:** el ancho de la cámara debe abarcar el ancho del paquete de madera, así como un espacio pleno necesario para un flujo de aire uniforme a través del paquete de madera.
- **Longitud:** la dimensión larga de la cámara debe diseñarse alrededor de la longitud de la madera.

La cámara debe resistir las cargas debido al peso de la madera, el equipo de calentamiento, el equipo de circulación de aire, etc. Una industria para realizar el proceso de secado de madera balsa a través de una cámara simple a vapor debe tener en consideración los siguientes elementos:

- La estructura del cerramiento
- El sistema de calefacción
- El sistema de ventilación [31]

2.2.7. Cargas de viento

La carga provocada por la acción del viento se produce en áreas externas de la estructura. Para establecer el reparto de las presiones que lleva a cabo esta carga sobre la estructura y las fuerzas resultantes están sujetas a la forma y las magnitudes de la estructura. [32]

2.2.7.1. Acción de la carga de viento.

La acción del viento se da cuando este sopla sobre una de sus caras o techado, los flujos cuando se acercan a la estructura son lentos o desacelerados. Esto provoca una fuerza perpendicular a la superficie de cada punto expuesto, o se puede decir que es una presión estática que se expresa de la siguiente manera. [32]

$$q_e = q_b * C_e * C_p \quad \text{Ec (1)}$$

Donde:

q_e : Presión estática del viento.

q_b : Presión dinámica del viento.

C_e : Coeficiente de exposición.

C_p : Coeficiente eólico o de presión.

2.2.7.2. Presión dinámica del viento

La presión dinámica del viento depende de la velocidad del viento en donde se construirá la estructura y la densidad que este presenta. [32]

$$q_b = 0,5 * \rho_{air} * V_b^2 \quad \text{Ec.(2)}$$

Donde:

ρ_{air} : Densidad del viento

V_b : Velocidad del viento

Tabla 5. Valores del coeficiente de exposición C_e

Grado de aspereza del entorno	Altura del punto considera (m)						
	3	6	9	12	15	24	30
Borde del mar o de un lago, con una superficie de agua en la dirección del viento de al menos 5 Km de longitud	2,4	2,7	3,0	3,1	3,3	3,5	3,7
Terreno rural llano sin obstáculos sin arbolado de importancia.	2,1	2,5	2,7	2,9	3,0	3,3	3,5
Zona rural accidentada o llena con algunos obstáculos aislados, como árboles o construcciones pequeñas	1,6	2,0	2,3	2,5	2,6	2,9	3,1
Zona urbana en general, industrial o forestal.	1,3	1,4	1,7	1,9	2,1	2,4	2,6
Centro de negocio de grandes ciudades, con profusión de edificios en altura.	1,2	1,2	1,2	1,4	1,4	1,9	2,0

Fuente: [32]

Tabla 6. Coeficiente eólico

	Esbeltez en el plano paralelo al viento					
	<0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	≥5,00
Coeficiente eólico de presión C_p	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8
Coeficiente eólico de succión C_s	-0,3	-0,4	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7

Fuente: [32]

2.2.8. Cargas sísmicas

Existen zonas susceptibles a sismos en estas áreas es indispensable considerar cargas sísmicas en el diseño de estructuras. En un análisis estructural es indispensable elaborar un estudio de la respuesta que presenta la estructura con respecto al movimiento del piso, mediante aproximaciones con cargas estáticas horizontales que actúan en los niveles superiores de una estructura. [23]

2.2.8.1. Fuerza cortante basal de diseño

El cortante basal es la fuerza proveniente de diseño por cargas laterales, aplicada en la base de la estructura, esta fuerza considera valores de aceleraciones máximas que se esperan en una determinada zona y su tipo de suelo. Esta debe ser aplicada en una dirección. [33]

$$V = \frac{Z * I * C_m}{R * \Phi_p * \Phi_E} \quad \text{Ec (3)}$$

Donde:

Z : Factor en función de la zona sísmica adoptada

I : Factor de tipo de uso, destino e importancia de la estructura

C_m : Coeficiente de tipo de suelo

R : Factor de reducción de respuesta estructural

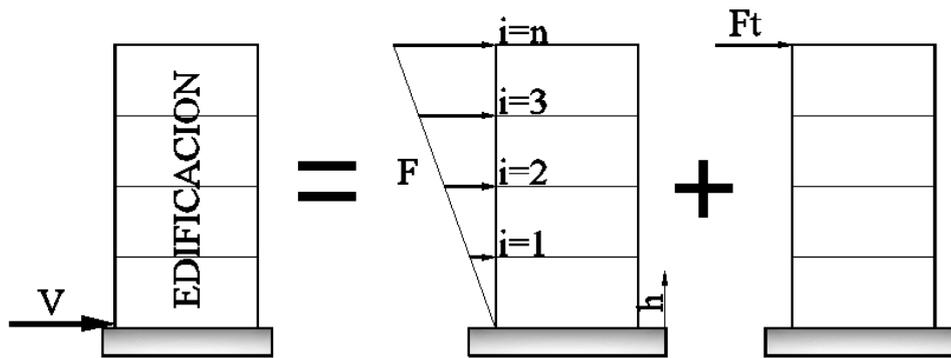
Φ_p : Factor de configuración estructural en planta

Φ_E : Factor de configuración estructural en elevación

2.2.8.2. Distribución vertical de fuerzas laterales

La fuerza cortante basal se debe distribuir de manera vertical en la altura de la estructura, esta fuerza tiene una distribución triangular aplicada de la estructura, más una fuerza que considera la contribución de modos superiores de vibración. [33]

Ilustración 18. Cortante basal V distribuido en la altura de la estructura.



Fuente: [30]

$$V = F_t + \sum_{i=1}^n F_i \quad \text{Ec.(4)}$$

Donde:

F_t : Fuerza concentrada en la cima de la estructura.

F_i : Fuerza aplicada en niveles.

La fuerza F_t aplicada en la cima de la estructura se presenta como:

$$F_t = 0,07 * T * V \quad \text{Ec.(5)}$$

Donde:

T : Periodo de vibración sísmico.

V : fuerza cortante basal de diseño.

El periodo de vibración sísmico se da de la siguiente forma:

$$T = C_t (h_n)^{\frac{3}{4}} \quad \text{Ec.(6)}$$

Donde:

C_t : factor de respuesta estructural, **Anexo 3**

h_n : Altura máxima de la estructura, medida desde la base.

Por último, el restante de la fuerza cortante basal, se expresa de la siguiente forma:

$$F_x = \frac{(V-F_t)*W_x*h_x}{\sum_{i=1}^n W_i*h_i} \quad \text{Ec.(7)}$$

Donde:

F_x : Fuerza a una altura x de la estructura

W_x : Peso a una altura x de la estructura

h_x : Altura x medida desde la base de la estructura

W_i : Peso de cada nivel.

h_i : Altura desde la base de la estructura

2.2.9. Selección del programa de secado

Un programa de secado es una tabla que indica temperaturas y depreciaciones psicométricas, que guían al operante de la cámara de secado, disminuir la humedad de la madera en un tiempo sensato lo menos deteriorada posible. Los programas se plantean para el secado de madera verde, sin embargo, también se pueden aplicar en madera previamente secada al aire. Inicialmente la madera seca rápidamente y es necesario que presente humedad relativa elevada para evitar grietas y a medida que la madera pierde humedad, se debe mantener una rapidez constante mientras el contenido de humedad lo permita. Los programas de secado son aplicados dependiendo del contenido de humedad, en el **Anexo 2** se describen el listado de horarios sugeridos y programas de secado para madera. [34]

2.2.10. Contenido de humedad en la madera.

La humedad de la madera se determina como un porcentaje del peso del agua que presenta la madera en su interior, respecto al peso que presenta cuando la madera está seca. [34]

$$C.H = \frac{P.V-P.S}{P.S} * 100 \quad \text{Ec. (8)}$$

Donde:

C. H: Contenido de humedad que presenta la madera [%]

P. V: Peso de la madera en verde [Kg]

P. S: Peso de la madera seca en horno o anhidrida [Kg]

2.2.11. Humedad específica del aire

La humedad específica es la mezcla de vapor de agua en un determinado volumen de aire seco. La humedad específica es una relación entre la cantidad de vapor de agua y aire seco que posee el aire atmosférico en una determinada zona, conocida como la relación de humedad, y es expresada de las siguientes formas: [35]

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} \quad \text{Ec. (9)}$$

$$\omega = 0,622 \frac{P_v}{P - P_v} \quad \text{Ec.(10)}$$

Donde:

ω : Humedad específica.

m_a : Masa de aire seco

m_v : Masa de vapor de agua

P : Presión atmosférica.

P_v : Presión parcial del vapor de agua.

2.2.12. Humedad relativa del aire

Para cada temperatura hay un contenido de vapor de agua, sin embargo, se puede aumentar el contenido de vapor de agua en el aire hasta que este se sature. La humedad relativa es la cantidad de vapor de agua que presenta el aire respecto a la cantidad de vapor de agua que puede contener el aire en su punto de saturación. [35]

$$\phi = \frac{P_v}{P_g} \quad \text{Ec. (11)}$$

Donde:

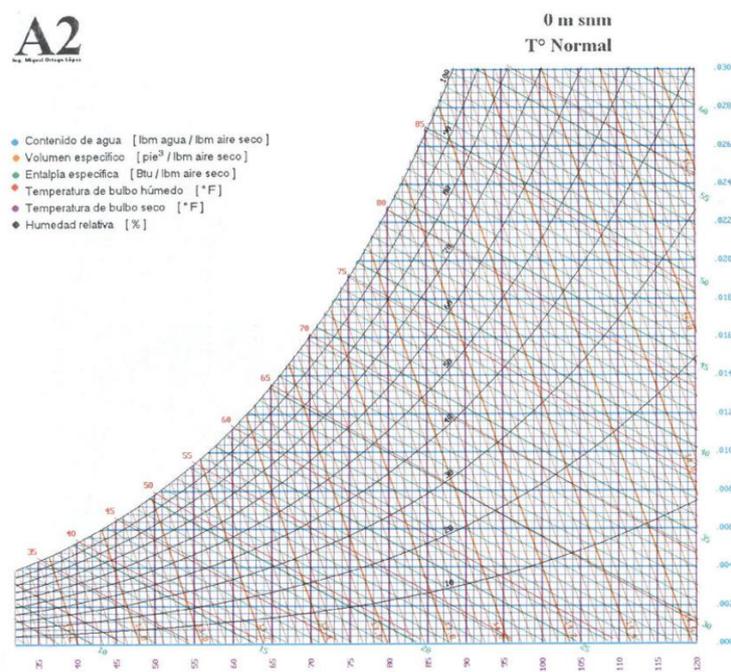
ϕ : Humedad relativa

P_g : Presión de saturación del agua a la temperatura del aire

2.2.13. Carta psicrométrica

La presión atmosférica y la altura sobre el nivel del mar, provocan variación en las propiedades del aire. La carta psicrométrica da la facilidad de manejar la mezcla de aire seco y vapor de agua en diversas condiciones, permitiendo eliminar el proceso de cálculos y obteniendo resultados exactos. [36]

Ilustración 19. Esquema de una carta psicrométrica



Fuente: [36]

2.2.14. Etapa de calentamiento de la cámara de secado y la madera.

Calentar la cámara de secado es aumentar la temperatura del ambiente hasta la temperatura de operación, donde la única fuente de calor es proporcionada por el sistema de

calentamiento. Donde los materiales presentan un cambio en la energía interna debido al calor suministrado. [30]

$$\dot{Q} = \frac{V \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_{fc} - T_a)}{t_{cal}} \quad \text{Ec. (12)}$$

Donde:

\dot{Q} : flujo de calor

V : Volumen del material a calentar

ρ : Densidad del material a calentar

C_p : Calor específico del material

T_{fc} : Temperatura media entre fuente de calor y el ambiente

T_a : Temperatura del ambiente

2.2.14.1. Tiempo de calentamiento de la cámara de secado

El calentamiento debe ser lento para evitar producir daños o defectos en la madera durante esta etapa. Se debe aumentar 5 °C por hora hasta llegar a la temperatura de operación establecida en el programa de secado. [30]

$$t_{cal} = \frac{\Delta T}{\dot{T}_{cal}} \quad \text{Ec.(13)}$$

Donde:

ΔT : Variación de temperatura en el horno

\dot{T}_{cal} : Taza de calentamiento

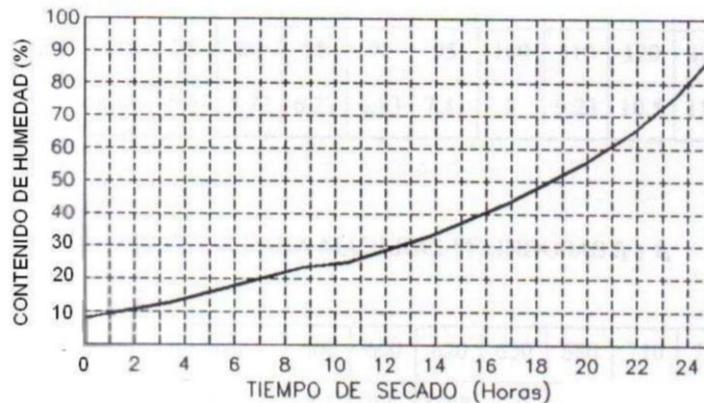
2.2.15. Etapa de evaporación del agua en la madera.

La etapa de evaporación comienza cuando la temperatura en la cámara de secado y la madera alcanzan la temperatura inicial de operación descrita en el programa de secado y la humedad de la madera es igual a la humedad relativa del ambiente. En esta etapa se desprende el agua libre y el agua de constitución de la madera hasta alcanzar la humedad deseada. [30]

2.2.15.1. Tiempo de secado de la madera

El tiempo de secado depende del tipo de madera coníferas o frondosas, ya que las maderas coníferas o livianas tienen un proceso de secado más rápido que las maderas frondosas o pesadas. [37]

Ilustración 20. Tiempo básico de secado de maderas coníferas.



Fuente: [37]

2.2.15.2. Tiempo de secado corregido con factores

Es la multiplicación de factores que modifican el tiempo en que el agua es extraída de la madera considerando distintos parámetros.

$$t_s = f_1 * f_2 * f_3 * f_4 * f_5 * f_6 \quad \text{Ec.(14)}$$

Donde:

t_s : Tiempo de secado corregido

f_1 : Factor de corrección debido al espesor

f_2 : Factor de corrección debido a la densidad de la madera

f_3 : Factor de corrección debido a la temperatura de secado

f_4 : Factor de corrección debido a la velocidad de secado

f_5 : Factor de corrección debido a la dificultad de secado

f_6 : Factor de corrección debido al agua libre [37]

Tabla 7. Corrección debido al espesor

Espesor (mm)	15	20	25	30	35	40	45	50	55
f_1	0,46	0,72	1	1,31	1,66	2,02	2,43	2,83	3,28
Espesor (mm)	60	65	70	75	80	85	90	95	100
f_1	3,72	4,20	4,68	5,20	5,72	6,27	7,41	8,00	9,23

Fuente: [37]

Tabla 8. Factores de corrección para maderas coníferas.

Peso Específico (Kg/m³)	340	370	400	430	460	490	520
f_2	0,74	0,82	0,90	1,0	1,1	1,2	1,3
Temperatura de secado (°C)	60	65	70	75	80	85	90
f_3	1,5	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8

Fuente: [37]

Tabla 9. Factor de corrección por velocidad de aire.

Velocidad (m/s)	1,5	1,75	2	2,25	2,50	2,75	3
f_4	1,19	1,08	1,0	0,93	0,87	,0,83	0,78

Fuente: [37]

Tabla 10. Factor de corrección para maderas difíciles de secar.

	Eucalipto	Laurel Tierno
f_5	2	1,4

Fuente: [37]

Tabla 11. Factor de corrección por agua libre.

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

Fuente: [37]

2.2.16. Velocidad requerida del aire de acuerdo al tipo de madera

Las velocidades requeridas se clasifican en dos rangos, de acuerdo al tipo de madera que se pretenda secar.

Tabla 12. Velocidades del aire requeridas según el tipo de madera

Tipo de madera	Velocidad
Maderas duras	1,5 a 2,5 m/s
Maderas blandas	3 a 5 m/s

Fuente: [38]

2.2.17. Acondicionamiento final

Una vez alcanzado un promedio del contenido de humedad deseado, en la madera se presentan tensiones entre la superficie del tablón y el centro, además en las piezas se presenta un contenido de humedad muy variables. Para disminuir tensiones y diferencias de contenido de humedad es necesario realizar un acondicionamiento, donde se recomienda un tiempo de dos horas por cada centímetro de espesor en los tablones a baja presión. [38]

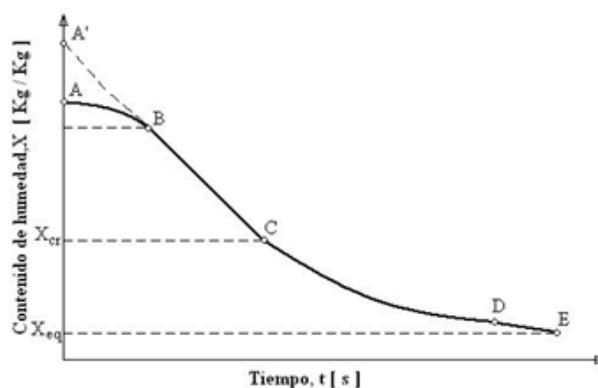
2.2.18. Enfriamiento

Esta etapa sólo se aplica en sitios donde el diferencial de temperatura entre la cámara y el ambiente es 40 °C. Diferencias más grandes ocasionan grietas inmediatas en la madera acompañada por un ruido de crujido es un indicador claro de la llegada abrupta de aire frío en la madera caliente. [38]

2.2.19. Curva de secado

Mediante esta curva se puede reconocer el contenido de humedad según el tiempo en el proceso de secado. La **Ilustración 21** indica que en el segmento A-B representa el cambio de humedad, seguido de un tramo B-C de forma lineal con una velocidad de secado constante, hasta llegar al punto crítico (Punto C), donde tiende a curvar identificado como el periodo de caída de velocidad formando una asíntota con el contenido de humedad X_{eq} alcanzando su valor mínimo de humedad sin llegar jamás al (punto E). [39]

Ilustración 21. Curva de secado



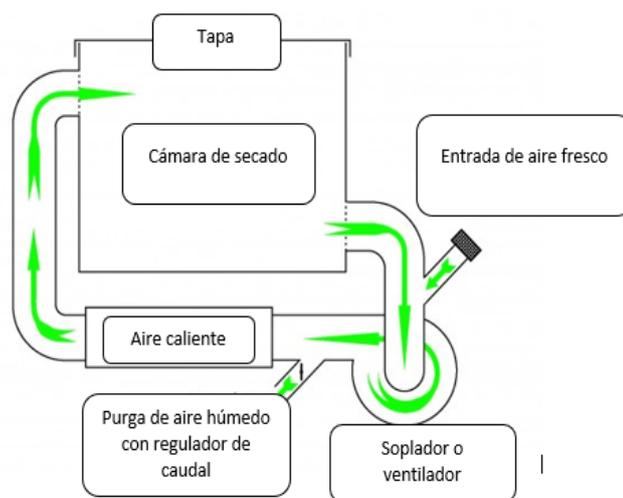
Fuente: [39]

2.2.20. Sistema de calefacción

Este sistema permite generar la transferencia de calor al interior de la cámara de secado. La fuente generadora, por lo general es una caldera que produce vapor, seguida de componentes que conducen el calor de la caldera hacia el interior de la cámara.

Siendo intercambiadores de calor o radiadores los encargados de realizar el proceso de calentamiento de la cámara de secado. [40]

Ilustración 22. Sistema de calefacción de una cámara de secado



Fuente: [40]

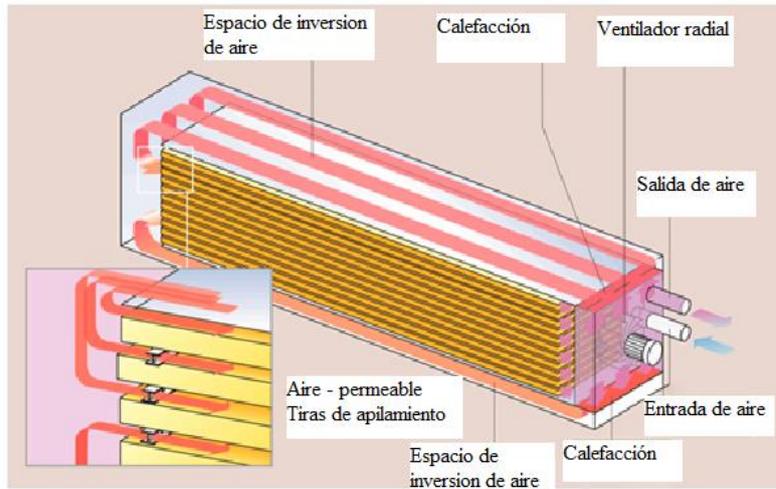
2.2.21. Sistema de Ventilación

El sistema de ventilación tiene la función de acumular la humedad de la superficie de las piezas de madera y transferirles calor. Entre mayor sea la velocidad, la velocidad de absorción de humedad de la superficie de la madera será mayor. [40]

2.2.21.1. Ventilación longitudinal

En cámaras con flujo de aire longitudinal, el aire es aspirado a través de la pila de madera por un ventilador alineado en la parte frontal. Cada tabla está rodeada por el flujo de aire de los cuatro lados a lo largo de toda su longitud. El aire fluye en paralelo a las fibras de madera, de acuerdo con el flujo de humedad natural en la madera. La alta velocidad del aire posible con ventilación longitudinal garantiza un secado uniforme en toda la longitud de la pila. Para permitir la circulación de aire dentro de la pila de madera, se requieren tiras de apilamiento especiales permeables al aire para el secado por flujo longitudinal. [41]

Ilustración 23. Ventilación longitudinal en una cámara de secado de madera.

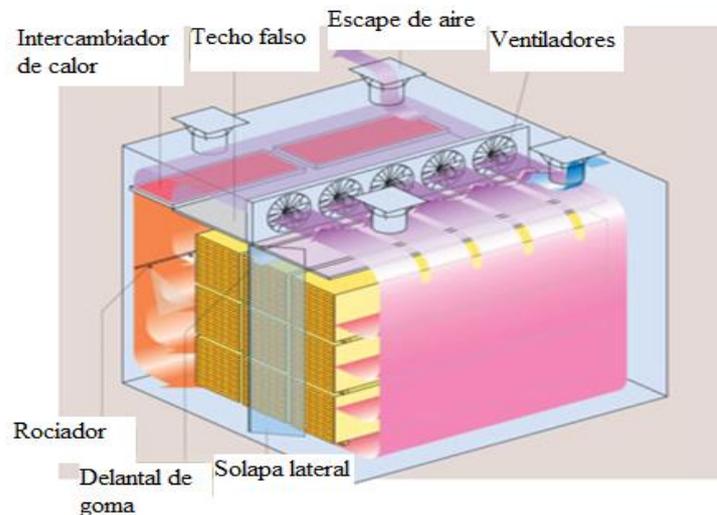


Fuente: [41]

2.2.21.2. Ventilación transversal

Dependiendo del tamaño de la cámara, se instalan varios ventiladores y, por lo tanto, se pueden construir cámaras en casi todos los tamaños. [41]

Ilustración 24. Ventilación transversal en un cámara de secado de madera.



Fuente: [41]

2.2.22. Ensayos mecánicos en la balsa

El objetivo de estos ensayos es determinar las propiedades mecánicas de MOE, MOR, resistencia a la compresión paralela y perpendicular a la fibra, y resistencia a la cizalla paralela a la fibra. [42]

2.2.22.1. Ensayo de tracción

La metodología de prueba se la realiza sobre la base de ASTM D3039. Para obtener datos de deformación más precisos y coherentes, ignorando las incertidumbres relacionadas con los portaobjetos o la falta de calibración resultante de la máquina universal. [43]

Ilustración 25. Ensayo de tracción en probetas de madera de balsa.



Fuente: [43]

2.2.22.2. Ensayos de flexión

El cuerpo de prueba se apoyó en los extremos de la máquina y la carga se aplicó en el centro de la unidad. [43]

Ilustración 26. Ensayo de flexión en probetas de madera de balsa.



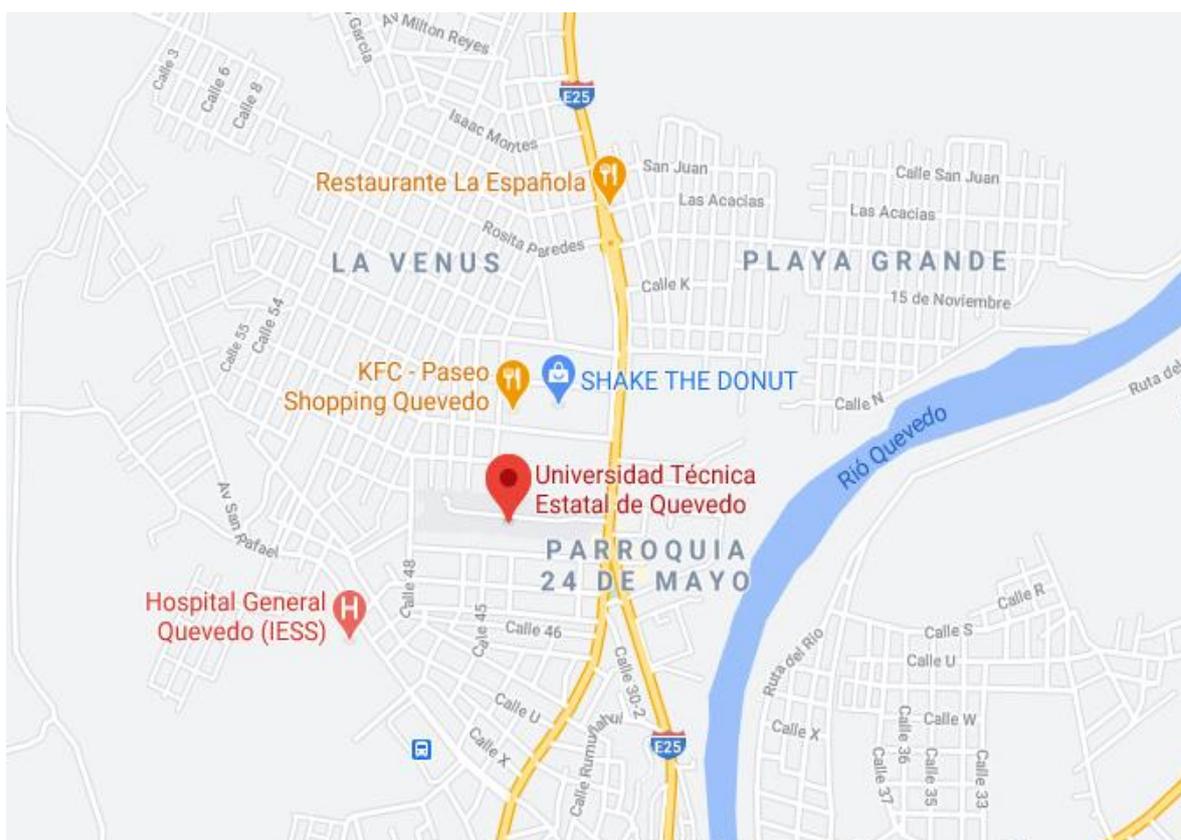
Fuente: [43]

CAPÍTULO III
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Localización

La presente investigación se llevó a cabo en la Universidad Técnica Estatal de Quevedo (UTEQ), ubicada vía a Santo Domingo km 1 ½, en el Cantón Quevedo, provincia de los Ríos. Se encuentra entre las coordenadas geográficas de 1°00'44,0" de latitud Sur y 79°28'13,4" de longitud Oeste.

Ilustración 27. *Ubicación de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo*



Fuente: GOOGLE MAPS

3.2. Tipos de investigación

3.2.1 Investigación Exploratoria

Este tipo de investigación es exploratoria debido a que en el país no existen muchas cámaras de secado con un diseño estructural diferente o empresas que fabriquen y comercialicen este tipo de cámaras de secado.

3.3. Métodos de Investigación

3.3.1. Método Inductivo

Este método se aplicó para analizar las propiedades termo físicas de la madera de balsa requerida para el proceso de secado artificial en cámaras, de esta manera optar por la elección más óptima de los materiales utilizables y demás elementos y componentes que darán forma al diseño de la cámara de secado.

3.3.2. Método Analítico

Se utilizó este método para ayudar a distinguir los elementos que conforman la investigación, con ello se procede a revisar cada uno de ellos por separado, este método implica el análisis de cada una de las partes o elementos constituidos en el tema.

3.3.3. Método Comparativo

Este método se usará para realizar comparaciones del diseño que se pretende realizar con los diseños convencionales de cámaras de secado para madera de balsa.

3.4. Fuentes de recopilación de Información

Las fuentes de información se las obtuvo a partir de documentos de sitios web, revistas, artículos científicos, proyectos de investigación y fichas técnicas.

3.5. Diseño de la Investigación

Este proyecto de investigación se elabora con el propósito de realizar un diseño diferente al convencional y proporcionar un adecuado funcionamiento en el proceso de secado de la madera de balsa.

3.6. Instrumentos de Investigación

Para la presente investigación se hicieron análisis de documentos, con el fin de diseñar una cámara de secado diferente a las convencionales, que cumpla con las características y resultados esperados.

3.7. Recursos Humanos y Materiales

Talento humano que ayudó en la elaboración del presente proyecto de investigación:

- Director del proyecto de investigación Ing. Ernesto Ruano Herrería, MSc
- Autores del proyecto de investigación Diaz Coello Julio Sebastián y Garofalo Zambrano Julio Alberto.

Materiales utilizados en la realización del presente proyecto de investigación:

- Laptop.
- Calculadora
- Materiales de oficina.
- Cuaderno
- Hojas de papel INEN A4 de 75 gr.
- Pendrive.
- Impresora.

CAPÍTULO IV
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados

La finalidad de la investigación, es diseñar una cámara de secado de madera mediante análisis térmicos y estructural para mejorar la eficiencia de secado, detallando los resultados de los cálculos obtenidos en su desarrollo, ya que los tiempos de secado que la mediana y pequeña industria dedicada a este tipo de madera son demasiado prolongados.

Mediante la investigación del proceso de diseño, se seleccionará o calculará dimensiones y elementos que conforman la cámara de secado, identificando los parámetros requeridos para el diseño estructural y de transferencia de calor.

4.1.1. Análisis preliminar del diseño

El diseño de la cámara de secado de madera de balsa, consiste en reducir la humedad a niveles de comercialización, para lo cual, se requiere determinar un volumen adecuado que manejen las medianas y pequeñas empresas, ya que según el volumen que se elija se podrá dar un dimensionamiento a la cámara de secado.

Las dimensiones de la cámara de secado y las condiciones climáticas de la zona donde se realizará el estudio son fundamentales para identificar los parámetros requeridos.

4.1.2. Dimensionamiento de los tablonos de madera de balsa

La cámara de secado de madera para las medianas y pequeñas empresas, se considerará, que el volumen de la madera a secar estará en un rango de $20 m^3$ a $25 m^3$, donde las medidas de los tablonos a secar contarán con las siguientes dimensiones.

Tabla 13. Dimensiones estándar del tablón de madera de balsa

ANCHO [m]	ESPESOR [m]	LARGO[m]
0,15	0,05	2,5

Elaborado por: LOS AUTORES

4.1.3. Dimensiones de los espaciadores

El espesor estándar de los tablonos de madera de balsa es de 50 mm, según la **TABLA 4.2**, para espesores de 40-65 mm, se debe utilizar espaciadores con un espesor promedio de 35 mm, con una distancia entre separadores de 0,75 m.

Tabla 14. *Espesor y distanciamiento de separadores de acuerdo a espesor de madera a secar*

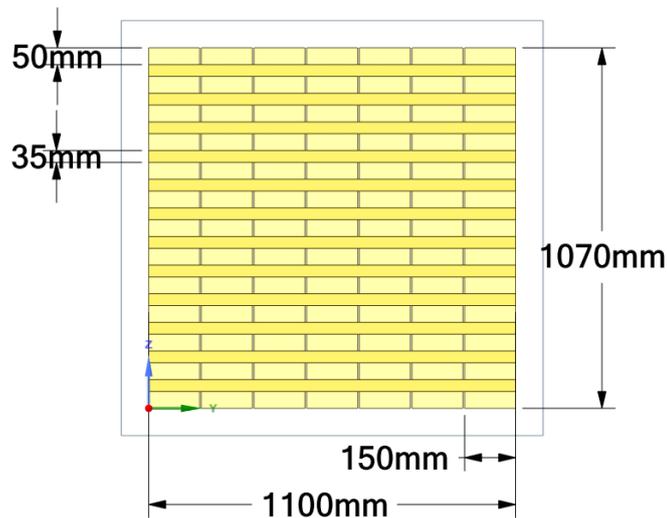
Espesor madera [mm]	Espesor separador [mm]	Distancia entre separadores [mm]
<u>40-65</u>	<u>30-40</u>	<u>700-800</u>

Elaborado por: LOS AUTORES

4.1.4. Dimensiones de las pilas de madera

Las dimensiones de los tablonces de madera de balsa tienen, 15 cm de ancho, 5 cm de espesor y 2,5 m de largo y los separadores con un espesor de 3,5 cm. Como el alto estándar de los paquetes es de 1,1 m, los valores más próximos a este son 13 tablonces y 12 separadores, dando un total de 107 cm de alto. Mientras que el ancho de los tablonces es de 15 cm y el paquete puede tener hasta 1,1 m de ancho, siendo 7 tablonces lo más próximo con un total de 1,05 m.

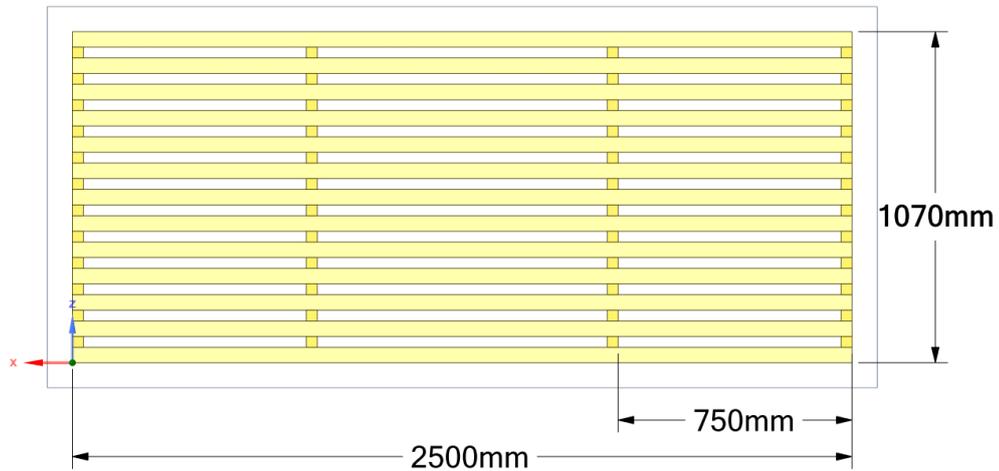
Ilustración 28. *Dimensiones de la vista frontal del paquete de madera*



Fuente: SOLIDWORKS

Elaborado por: LOS AUTORES

Ilustración 29. Dimensiones de la vista lateral del paquete de madera

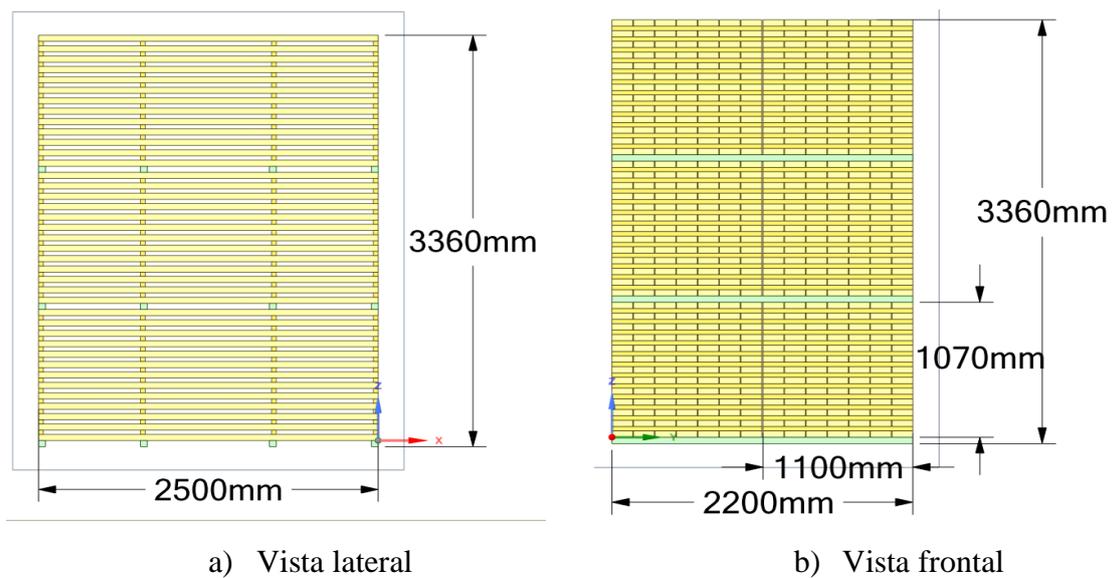


Fuente: SOLIDWORKS

Elaborado por: LOS AUTORES

De acuerdo a la disposición geométrica que presentará la cámara y que se manejaran volúmenes de madera utilizados por medianas y pequeñas empresas dedicadas al secado de madera, se contará con dos pilas de 3 paquetes de alto y 2 de profundidad. Las filas de paquetes deben contar con espaciadores de 50 mm, para facilidad de transportación de las mismas con el montacargas.

Ilustración 30. Dimensiones de las pilas de madera



a) Vista lateral

b) Vista frontal

Fuente: SOLIDWORKS

Elaborado por: LOS AUTORES

4.1.5. Estudio de criterios de ponderación

Con el estudio de criterios, se pretende jerarquizar los parámetros más relevantes para identificar el diseño más adecuado, según los requerimientos necesarios para obtener mejoras de eficiencia en el proceso de secado.

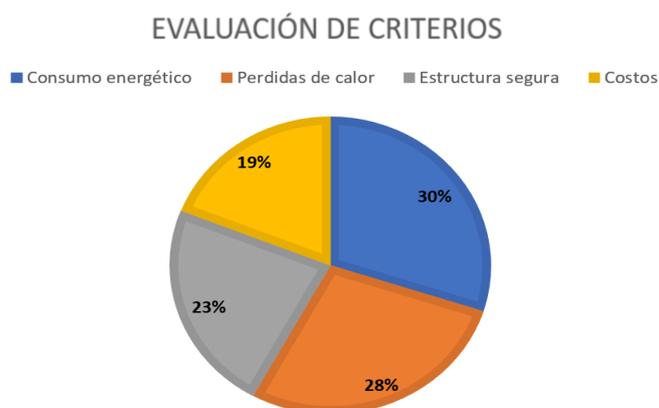
Tabla 15. Matriz de comparación de criterios

Criterios	Consumo energético	Pérdidas de calor	Estructura segura	Precio de construcción	$\sum+1$	Pond.
Consumo energético	1	0,6	0,7	0,7	3	30 %
Pérdidas de calor	0,4	1	0,7	0,7	2,8	28 %
Estructura segura	0,3	0,3	1	0,7	2,3	23 %
Costos	0,3	0,3	0,3	1	1,9	19 %
				SUMA	10	100%

Elaborado por: LOS AUTORES

Como muestra la **Tabla 15**, se obtuvieron valores cuantitativos, que representan la importancia de los parámetros, que a continuación serán expuesto en la **Ilustración 34** para una mejor interpretación.

Ilustración 31. Porcentajes para jerarquización de criterios



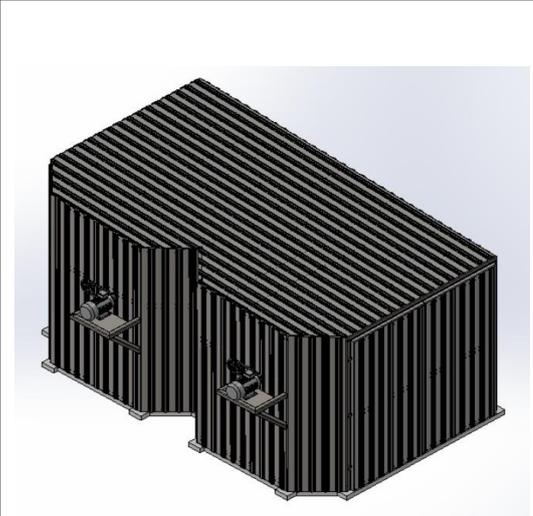
Elaborado por: LOS AUTORES

Donde se puede reconocer que el criterio de mayor importancia a la necesidad de un menor consumo energético con un **30 %**, y el menos relevante sería los costos de construcción con un **19 %**. Gracias a esto se determina que la prioridad del diseño es diseñar una cámara de secado con materiales que ayuden a la disminución de consumo energético y pérdidas de calor por parte de las paredes, durante las etapas del proceso de secado, seguido de un diseño estructural confiable para la seguridad de los operadores y garantizar su estabilidad durante posibles fenómenos naturales tales como sismos.

4.1.5.1. Evaluación de alternativas

La evaluación se centra en analizar los puntos altos y bajos que presentan las alternativas, teniendo en cuenta la relevancia determinada de cada criterio. A continuación, se presentan las alternativas de diseño con las características más relevantes.

Tabla 16. Alternativa de diseño 1

	Características	
	Tipo de estructura	Metálica
	Materiales de la conformación de las paredes	<ul style="list-style-type: none"> • Recubrimiento galvanizado • Lana de vidrio • Plancha de aluminio
	Método de secado	Decantación
	Ubicación de serpentines	Pared lateral
	Ubicación de ventiladores	Pared lateral

Elaborado por: LOS AUTORES

Tabla 17. Alternativa de diseño 2

	Características	
	Tipo de estructura	Columnas de concreto
	Materiales de la conformación de las paredes	<ul style="list-style-type: none"> • Ladrillo refractario • concreto
	Método de secado	Decantación
	Ubicación de serpentines	Sobre losa de concreto
Ubicación de ventiladores	Sobre losa de concreto	

Elaborado por: LOS AUTORES

Una vez identificadas las características se procede a elaborar las tablas, donde se interpreta que alternativa presenta ventajas sobre la otra en los criterios antes mencionados.

Tabla 18. Evaluación del criterio consumo energético.

Consumo energético	Alternativa 1	Alternativa 2	$\sum+1$	Pond.
Alternativa 1	1	1	2	66,67 %
Alternativa 2	0	1	1	33,33 %
		Suma	3	100 %

Elaborado por: LOS AUTORES

La alternativa 1 es mejor, puesto que, al contar con recubrimientos metálicos, los cuales en el mercado tienen un mínimo espesor que puede ir de **décimas de milímetro a 4 mm** y el espesor requerido de la lana de vidrio en cámaras de secado es de **10 cm**. Necesitan un menor flujo de calor para alcanzar las temperaturas de operación según el programa de secado. En comparación, al espesor de **17 cm** requerido del bloque refractario en la construcción de las cámaras de sacado y con la suma de las capas de recubrimiento de mortero puede llegar a los **20cm** de espesor total en su composición. Esto es una desventaja en la alternativa 2 ya que los materiales a comparar presentan calores específicos muy similares.

Tabla 19. Evaluación del criterio de pérdidas de calor

Pérdidas de calor	Alternativa 1	Alternativa 2	$\Sigma+1$	Pond.
Alternativa 1	1	1	2	66,67 %
Alternativa 2	0	1	1	33,33 %
		Suma	3	100 %

Elaborado por: LOS AUTORES

La lana de vidrio es el material que conforma en su mayoría el espesor de las paredes y puesto que su conductividad térmica es de **0,004 w/m * K**, contra **0,72 w/m * K** que presenta el ladrillo refractario. Por ende, se puede deducir que la lana de vidrio presenta una mayor resistencia a la conducción térmica, haciendo de la alternativa 1 la más óptima.

Tabla 20. Evaluación de criterio estructura segura

Estructura segura	Alternativa 1	Alternativa 2	$\Sigma+1$	Pond.
Alternativa 1	1	1	2	66,67 %
Alternativa 2	0	1	1	33,33 %
		Suma	3	100 %

Elaborado por: LOS AUTORES

El acero estructural presenta un mejor módulo elástico, dotándole mejores capacidades para poder soportar fenómenos naturales, como sismos. Las estructuras elaboradas de concreto presentan buena resistencia y durabilidad, pero al ser un material duro, puede presentar cuarteamientos durante sismos, por lo tanto, la alternativa 1 tiene una ventaja.

Tabla 21. Evaluación del criterio precio de construcción

Precio de construcción	Alternativa 1	Alternativa 2	$\Sigma+1$	Pond.
Alternativa 1	1	0	2	33,33 %
Alternativa 2	1	1	1	66,66 %
		Suma	3	100 %

Elaborado por: LOS AUTORES

La alternativa 1 una presenta una amplia desventaja, puesto que la construcción de una estructura metálica es más costosa que una de vigas de concreto, a su vez, las planchas de aluminio tienen un precio muy elevado en el mercado y necesitan de elementos estructurales secundarios en la estructura para la sujeción de estas.

4.1.5.2. Evaluación de la prioridad

Mediante los valores calculados de ponderación para cada criterio jerarquizado, se obtuvo lo siguiente:

Tabla 22. Evaluación de la prioridad de diseño

Conclusiones	Consumo energético	Pérdidas de calor	Estructura segura	Precio de construcción	Σ	Prioridad
Alternativa 1	0,66 * 0,3	0,66 * 0,28	0,66 * 0,23	0,33 * 0,19	0,6	1
Alternativa 2	0,33 * 0,3	0,33 * 0,28	0,33 * 0,23	0,66 * 0,19	0,4	2

Elaborado por: LOS AUTORES

De acuerdo a la **Tabla 22**, la **alternativa 1** va acorde con el objetivo principal de la investigación, puesto que cumple con la mayoría de requerimientos.

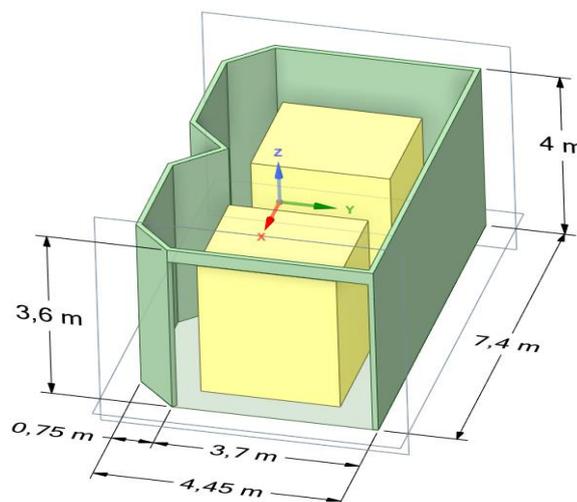
Materiales de construcción presentan mejores características termodinámicas, necesarios en la búsqueda de menores pérdidas de calor y disminuir el consumo energético. A su vez, la estructura metálica, otorga la seguridad requerida a lo largo de la vida útil de la cámara de secado.

4.1.6. Dimensiones internas de la cámara de secado

Para la separación entre la pila y las paredes se tomará un valor de 0,6 m y la separación de la pila al techo será de 0,5 m, el cual variará, ya que el techo tendrá una inclinación de 3 %. El diseño cuenta con dos pilas de madera, por lo tanto, una de las paredes laterales será dividida en dos secciones iguales para el acomodo de ventiladores y serpentines, agregando 0,75 m más al ancho de la cámara. Las medidas internas serán las siguientes:

- Altura máxima: 4 m
- Ancho: 4,45 m
- Profundidad: 7,4 m

Ilustración 32. Dimensiones de la cámara de secado.



Fuente: SOLIDWORKS

Elaborado por: LOS AUTORES

4.1.7. Disposición de la cámara de secado

El diseño de la cámara de secado consiste en diseñar una pared conformada de secciones oblicuas y horizontales, con el propósito de que las paredes horizontales sirvan para soporte

de los ventiladores, y el serpentín que en sus extremos cuenta con dos paredes oblicuas con sentidos contrarios, para no provocar que el flujo de aire dentro de la cámara tome una dirección recta que choque con la pared posterior a la pila, sino que se cree dos corrientes que circulan alrededor de la pila y se encuentren al chocar con la pared posterior, y se cree un flujo turbulento que circule por toda la madera.

. Ilustración 33. Disposición de la estructura de la cámara de secado



Fuente: SOLIDWORKS

Elaborado por: LOS AUTORES

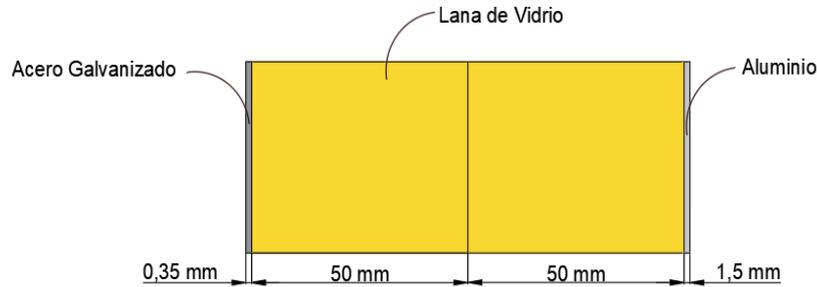
4.1.8. Materiales que compondrán las paredes, puertas y techado de la cámara de secado

La lana de vidrio será el aislante térmico utilizado, ya que posee una alta resistencia térmica, a su vez, resiste a altas temperaturas, no produce gases y es un producto reciclable. Esta tendrá un espesor de 100 mm, debido a que es un espesor comercial dentro del rango establecido y que coincidirá con el perfil utilizado para la estructura.

El perfil utilizado para la estructura será el tubo cuadrado de acero negro de (100x100) mm, debido a encontrarse en un ambiente corrosivo debe pasar un proceso de pintado. En este, se colocarán planchas de cubiertas metálicas de 0,35 mm de espesor para el exterior, en el

interior de la cámara irán planchas de aluminio con espesores de 1,5 mm. Por lo tanto, las paredes de la cámara de secado contarán con la siguiente configuración.

Ilustración 34. Materiales que componen las paredes de la cámara.



Fuente: SOLIDWORKS

Elaborado por: LOS AUTORES

4.1.8.1. Dimensiones comerciales de los materiales que componen las paredes de la cámara de secado

Los catálogos de los fabricantes se encuentran en el **Anexo 1**, a continuación, en la **Tabla 15** se resumirán las dimensiones comerciales de los materiales seleccionados que conforman las paredes y sus respectivas densidades o masa por unidad de longitud o área.

Tabla 23. Dimensiones de los materiales que componen las paredes de la cámara de secado.

Materiales	Dimensiones	Parámetro para cálculo de masa
Plancha de aluminio	(1220*2440*3) mm	2700 kg/m ³
Lana de vidrio	(600*1200*50) mm	16 kg/m ³
Plancha de recubrimiento galvanizado	(1000*3000*0,35) mm	3,35 kg/m ²
Tubo cuadrado estructural	(100*100*3) mm	9,17 kg/m
Correas tipo G	(100*50*15*2) mm	3,38 kg/m

Elaborado por: LOS AUTORES

4.1.9. Identificación de las cargas de diseño

La estructura metálica requiere de un análisis de las cargas propias de la estructura, tanto como de cargas que son provocadas por el medio ambiente, tales como: cargas de lluvia, viento y sísmicas. Las cargas que actúan en la estructura metálica serán identificadas y se tomarán parámetros según la norma ecuatoriana de la construcción.

4.1.9.1. Cargas muertas de la cámara de secado

Las cargas muertas en la cámara de secado son el peso propio de los miembros estructurales y el peso propio de los materiales que componen las paredes, puertas y el techado. Tomando las especificaciones de los catálogos de distribuidores expuestas en la **Tabla 15**, se procede a calcular el volumen que ocuparán los materiales del cálculo:

- Cargas muertas en las paredes

Las paredes que conforman la cámara de secado cuentan con un área total de $75,75 m^2$ y 128,6 m de longitud de tubo estructural cuadrado, de acuerdo a esta área se obtienen los datos de volumen y cargas impuestas por los materiales que conforman las paredes en la **Tabla 24**.

Tabla 24. Volumen y cargas totales que presentan los materiales que componen las paredes de la cámara

Materiales	Espesor [m]	Volumen [m ³]	Masa [kg]	Carga [N]
Plancha de aluminio	0,002	0,15	405	3973,05
Lana de vidrio	0,1	7,58	121,28	1189,75
Plancha de recubrimiento galvanizado	0,00035	0,026	253,76	2489,38
Total, de material de composición de paredes				7652,18
Tubo cuadrado estructural	0,003	-	1179,3	11568,6

Elaborado por: LOS AUTORES

- Cargas muertas del techado de la cámara de secado

El techado de la cámara de secado está conformado al igual que las paredes de la cámara por miembro estructurales y los materiales que componen el recubrimiento de este. El techado

cuenta con un área de $31,8 \text{ m}^2$, 25 m de correa tipo G y $21,02 \text{ m}$ de tubo estructural cuadrado, en la **Tabla 25** serán resumidas las cargas que conforman el techado de la cámara.

Tabla 25. Cargas muertas del techado de la cámara de secado

Materiales	Espesor [m]	Volumen [m ³]	Masa [kg]	Carga [N]
Plancha de aluminio	0,002	0,06	171,72	1684,57
Lana de vidrio	0,1	3,18	50,88	499,13
Plancha de recubrimiento galvanizado	0,00035	0,011	106,53	1045,06
Total, de material de composición de paredes				3228,8
Correas tipo G	0,002	-	84,5	828,95
Tubo cuadrado estructural	0,003	-	192,75	1890,91
Total, de material estructural				2719,86

Elaborado por: LOS AUTORES

- Cargas producidas por las puertas de la cámara de secado.

La cámara de secado cuenta con dos puertas sujetas por bisagras a la estructura de la cámara cada una tiene un área de $6,66 \text{ m}^2$ y 6 m de tubo estructural cuadrado, en la **Tabla 26** están descritas las cargas propias de las puertas.

Tabla 26. Cargas producidas por las puertas de la cámara de secado

Materiales	Espesor [m]	Volumen [m ³]	Masa [kg]	Carga [N]
Plancha de aluminio	0,002	0,013	35,1	344,33
Lana de vidrio	0,1	0,67	10,72	105,16
Plancha de recubrimiento galvanizado	0,00035	0,0023	22,31	218,86
Total, de material de composición de puertas				668,35
Tubo cuadrado estructural	0,003	-	55,05	540

Elaborado por: LOS AUTORES

4.1.9.2. Cargas vivas en el techado de la cámara.

De acuerdo al código ecuatoriano de construcción (CPE), aparte de las cargas muertas que soporta el techado, se debe considerar las cargas vivas que actúan verticalmente sobre el techado.

Tabla 27. Cargas vivas mínimas para cubiertas en kg/m²

INCLINACIÓN DE LA CUBIERTA	ÁREA TRIBUTARIA DE CARGA EN METROS CUADRADOS PARA CUALQUIER ELEMENTO ESTRUCTURAL		
	0 a 20	21 a 60	Sobre 60
Plana o con pendiente menor que 1:3 Arco o bóveda con flecha menor a 1/8 de luz.	100	80	60
Pendiente de 1:3 a menos de 1:1 Arco o bóveda con flecha de 1/8 de luz a menos de 3/8 de luz.	80	70	60
Pendiente de 1:1 y mayor Arco o bóveda con flecha de 3/8 de luz o mayor.	60	60	60
Marquesinas, excepto cubiertas con tela.	25	25	25
Invernaderos y edificios agrícolas.	50	50	50

Fuente: [44]

La pendiente que presenta la cubierta de la cámara de secado es menor que 1:3 y el área tributaria que soportan los elementos estructurales es de 0 a 20, por lo tanto, la carga viva para la cubierta es de 100 kg/m^2 .

4.1.9.3. Cargas producidas por fenómenos ambientales.

Estas cargas son medidas de acuerdo a parámetros ya establecidos en códigos internacionales como el “Código Técnico de la edificación de España”, para el cálculo de las cargas de viento y el “Código Ecuatoriano de la Construcción” para conocer las cargas producidas por sismos.

- Cargas producidas por el viento.

La presión de velocidad generada por el viento, se considera la máxima velocidad de viento que presenta Quevedo 4 m/s , y una densidad del viento de $1,25 \text{ kg/m}^3$, de acuerdo a la **Ecuación 2**, se obtienen los siguientes resultados.

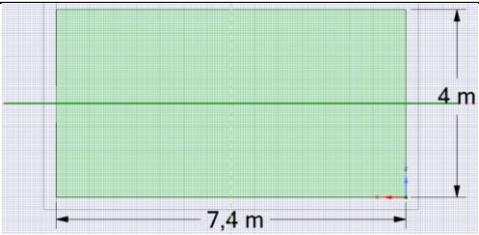
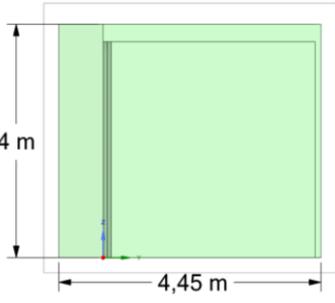
$$q_b = 0,5 * \rho_b * V_b^2$$

$$q_b = 0,5 * 1,25 \text{ kg/m}^3 * \left(8 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2$$

$$q_b = 40 \text{ N/m}^2$$

La cámara de secado de madera de balsa se considerará que estará ubicada en una zona de pocos obstáculos y teniendo en cuenta que tiene una altura de 4 m, se obtiene según la **Tabla 3** un coeficiente de exposición de 1,73. La cámara tiene como medidas generales 4 m de altura, 7,4 m de largo y 4,45 m de ancho, por consiguiente, se detalla la esbeltez en el plano paralelo al viento en la **Tabla 28**.

Tabla 28. Cálculo de esbeltez según los planos paralelos al viento

Plano según el punto de origen	Caras perpendiculares al plano	Esbeltez según los planos
Plano X		$4 \text{ m} / 7,4 \text{ m} = 0,54$
Plano Y		$4 \text{ m} / 4,45 \text{ m} = 0,89$

Plano Z		$4,45 \text{ m} / 7,4 \text{ m} =$ $0,57$
----------------	--	--

Fuente: SOLIDWORKS

Elaborado por: LOS AUTORES

Para conocer las cargas de succión, se debe observar la **Tabla 4**, donde se encuentran datos a diferentes esbelteces, por consiguiente, en la **Tabla 29** se procede a interpolar teniendo como resultado:

Tabla 29. *Coefficientes eólicos requeridos en el cálculo de cargas de viento en las paredes y techado de la cámara de secado.*

	Esbeltez en el plano paralelo al viento		
	0,54	0,57	0,94
Coefficiente eólico de presión C_p	0,716	0,728	0,8
Coefficiente eólico de succión C_s	-0,4	-0,4	-0,476

Elaborado por: LOS AUTORES

Contando con los coeficientes eólicos de presión y succión que actúan en la cámara de secado, se procede al cálculo con ayuda de la **Ecuación 1**

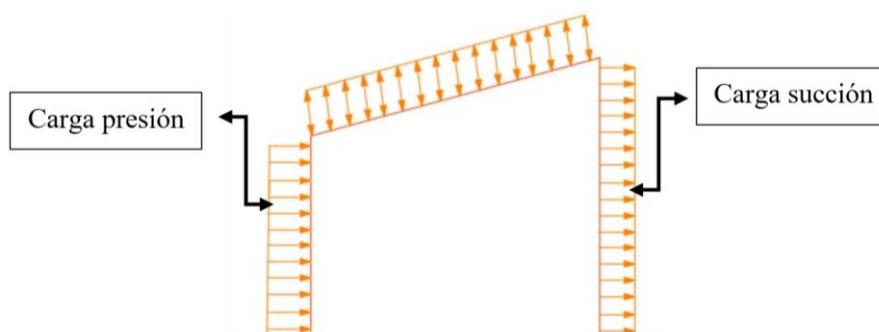
$$q_e = q_b * C_e * C_p$$

Tabla 30. *Presiones estáticas del viento a la estructura de la cámara de secado en $[N/m^2]$*

	Cargas a presión	Cargas a succión
Paredes laterales	49,55	-27,68
Paredes frontales	50,38	-27,68
Techado	55,36	

Elaborado por: LOS AUTORES

Ilustración 35. Representación de cargas de presión y succión



Elaborado por: LOS AUTORES

Como se aprecia en la **Ilustración 38**, las cargas de presión y succión tienen el mismo sentido, por lo tanto, pueden ser considerada como una carga total actuando en una superficie.

Tabla 31. Presiones estáticas del viento a la estructura de la cámara de secado en $[N/m^2]$

Cargas de viento	
Paredes laterales	77,23
Paredes frontales	78,06
Techado	55,36

Elaborado por: LOS AUTORES

- Cargas producidas por sismos.

La estructura de la cámara de secado es metálica y presenta una altura de 4 m, de acuerdo a el **Anexo 3**, el factor de respuesta estructural es 0,09. Con estos datos se procede a calcular el periodo de vibración con la **Ecuación 6**.

$$T = C_t * (h_n)^{3/4}$$

$$T = 0,09 * (4 \text{ m})^{3/4}$$

$$T = 0,2545 \text{ s}$$

Para calcular corte basal de diseño se utiliza los factores del **Anexo 3**, donde, se debe considerar la zona sísmica de Quevedo que presenta un factor $Z=0,30$, el suelo para la construcción será firme contando con un coeficiente de tipo de suelo de $S=1$ y un coeficiente

de suelo $C_m = 2,5$, el factor según el tipo de uso $I=1$, la estructura está conformada de elementos de acero, contando con un coeficiente de reducción de respuesta estructural $R=7$, el factor de configuración estructural en planta $\Phi_P = 0,9$ y el factor de configuración estructural en elevación será $\Phi_E = 0,8$. Se procede al cálculo de cortante basal de acuerdo a la **Ecuación 3**.

$$V = \frac{Z * I * C_m}{R * \Phi_E * \Phi_P} * W$$

$$V = \frac{0,30 * 1 * 2,5}{7 * 0,8 * 0,9} * 24,53 \text{ kN}$$

$$V = 3,65 \text{ kN}$$

Con el corte basal se procede al cálculo de la distribución de vertical de fuerzas, mediante la **Ecuación 5**.

$$F_t = 0,07 * T * V$$

$$F_t = 0,07 * 0,2545 * 3,65 \text{ kN}$$

$$F_t = 65,02 \text{ N}$$

Por tanto, la fuerza aplicada a 4 m de altura según la **Ecuación 7** es:

$$F_x = \frac{(V - F_t) * W_x * h_x}{\sum_{i=1}^n W_i * h_i}$$

Como la estructura solamente cuenta con un piso $W_i * h_i = W_x * h_x$ por lo tanto se simplifican.

$$F_x = (3,65 \text{ kN} - 0,065 \text{ kN})$$

$$F_x = 3,58 \text{ kN}$$

4.1.10. Análisis de esfuerzos y deformaciones a la estructura de la cámara de secado

Mediante el software CAD “SolidWorks” se identifica el esfuerzo y las deformaciones máximas que la estructura de la cámara de secado de madera presenta, comprobando si el

diseño soporta dichas tensiones y deformaciones de acuerdo al límite de fluencia del material utilizado en la estructura (acero estructural negro).

4.1.10.1. Cargas presentes en la estructura

En el estudio de esfuerzos y deformaciones el software se determina el peso de los miembros estructurales, al multiplicar por la gravedad, esta será considerada junto con las demás cargas calculadas en el punto **4.1.8**. Dichas cargas son puntuales, por lo que, se requiere transformar a carga por metro, distribuidas en los miembros estructurales, en caso lo requiera el análisis. En la **Tabla 32**, son presentadas las cargas de acuerdo a como se considera en el análisis estructural.

Tabla 32. Cargas aplicadas en la estructura.

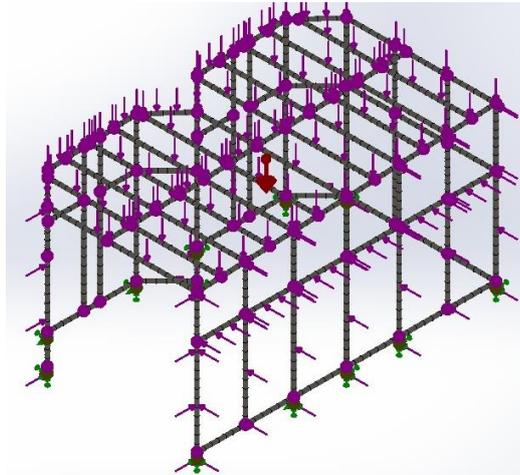
Cargas	Valor
Carga muerta, peso propio	9,81 m/s
Carga muerta, materiales del techo	58,43 N/m
Cargas de viento del techo	33,22 N/m
Cargas de viento pared lateral	92,67 N/m
Cargas de la puerta	150 N/m
Cargas de sismo	3580 N
Cargas vivas del techo	588,6 N/m

Elaborado por: LOS AUTORES

4.1.10.2. Resultados del análisis estructural

La estructura de la cámara de secado debe soportar todas las tensiones producidas por el peso de los materiales que conforman las paredes y cargas ambientales que se puedan experimentar el algún momento. En la **Ilustración 39** se puede observar la distribución de las cargas establecidas en la **Tabla 32**.

Ilustración 36. Distribución de cargas en la estructura de la cámara de secado

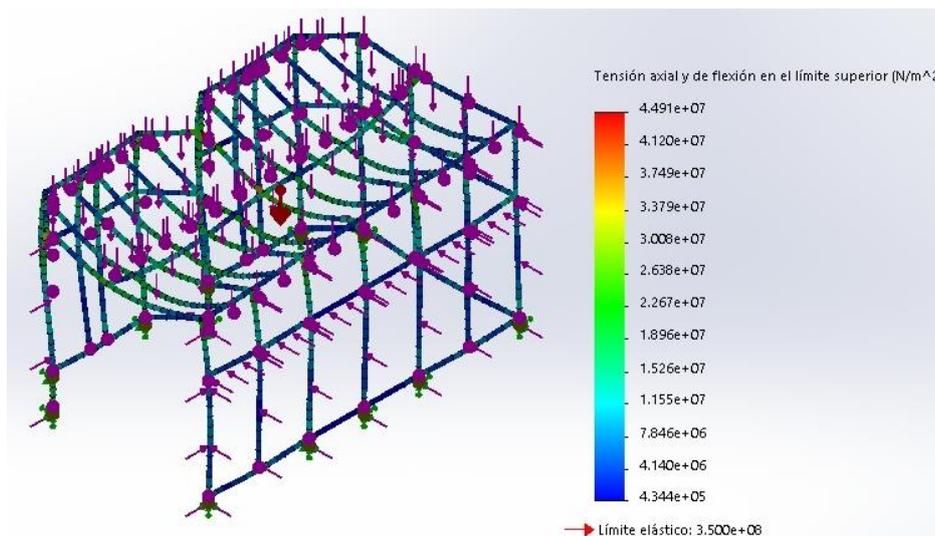


Fuente: SOLIDWORKS

Elaborado por: LOS AUTORES

Efectuada la distribución de cargas existentes en la estructura de la cámara de secado, se realiza el estudio de elementos finitos, obteniendo los siguientes resultados de tensiones descritos en la **Ilustración 40**.

Ilustración 37. Tensiones máximas presentes en la estructura

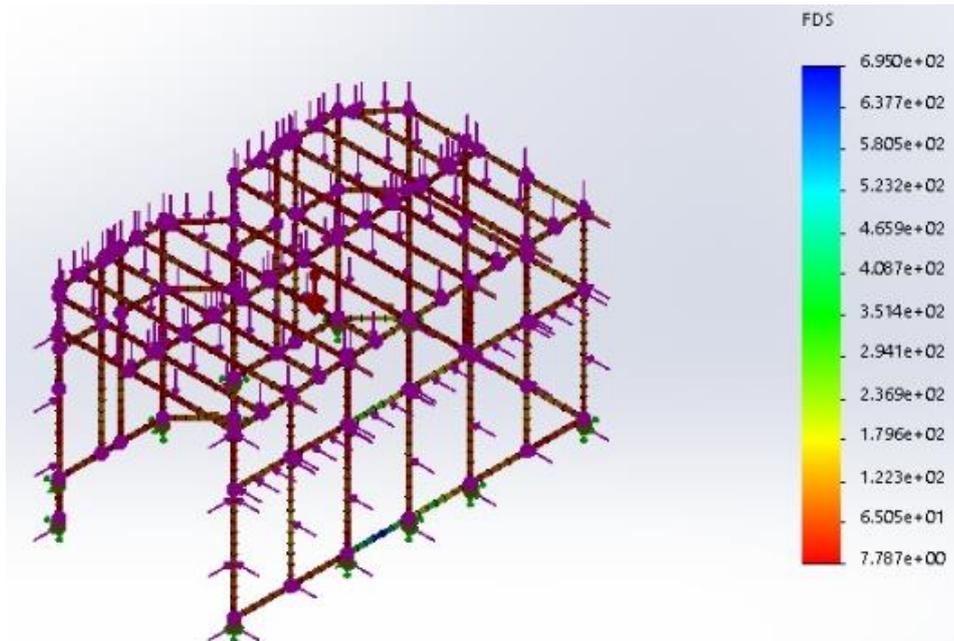


Fuente: SOLIDWORKS

Elaborado por: LOS AUTORES

Mediante el análisis estructural se conoce que la tensión axial y de flexión que presenta la estructura alcanza $\sigma = 44,9 \text{ MPa}$, siendo el techado donde se presenta la mayor concentración de esfuerzos. Teniendo en cuenta que los tubos cuadrados y las correas tipo G son fabricadas con acero **AISI 1010** y presentan un límite elástico de $S_y = 350 \text{ MPa}$. Se procede a identificar el factor de seguridad que presenta el diseño en la **Ilustración 41**.

Ilustración 38. Factor de seguridad que presenta la estructura de la cámara de secado

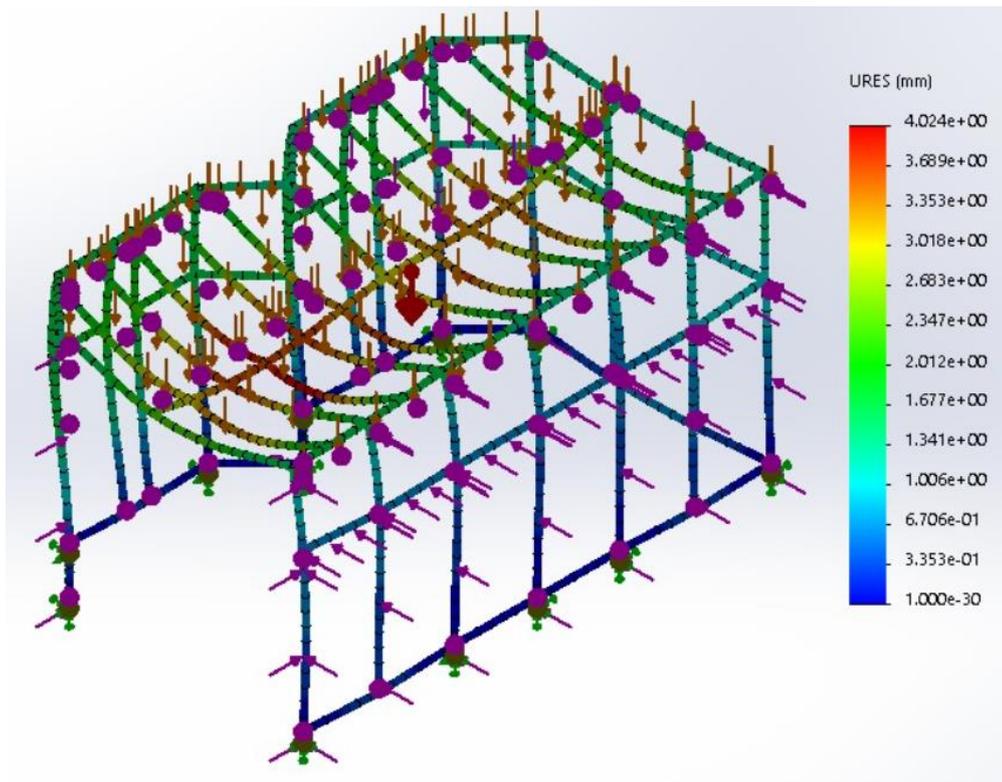


Fuente: SOLIDWORKS

Elaborado por: LOS AUTORES

El factor de seguridad mínimo es de $n_{min} = 7,78$, presentando una buena confiabilidad a la estructura de la cámara de secado. Por otra parte, los esfuerzos producidos por las cargas y el peso propio de la estructura, generan deformaciones en las vigas que se pueden observar en la **Ilustración 42**.

Ilustración 39. Deformaciones máximas presentadas por el diseño de la estructura



Fuente: SOLIDWORKS

Elaborado por: LOS AUTORES

Donde la zona de la estructura con mayor deformación, es el techado, alcanzando los **4 mm**. Mientras que en las paredes se puede considerar una deformación baja.

4.1.11. Parámetros de diseño

Las siguientes tablas indican los parámetros iniciales, para realizar los cálculos termodinámicos que identifiquen la cantidad de calor que requieren los componentes y factores que influyen en el proceso de secado. También se podrán conocer los tiempos requeridos según el programa de secado para elaborar las curvas de contenido de humedad, vs tiempo.

Tabla 33. Valores de los parámetros de la madera a considerar en el diseño de la cámara de secado

Parámetros de la Madera	Valores
Volumen a secar	20,48 m ³ (1092 tablones)
Volumen de la pila	35,31 m ³
Contenido de humedad en verde	100 %
Contenido de humedad final	12 %
Densidad promedio de la madera de balsa	340 kg/m ³
Masa (cantidad de madera de balsa)	6963,2 kg

Elaborado por: LOS AUTORES

Tabla 34. Valores de los parámetros del aire que circula dentro de la cámara de secado

Parámetros del aire dentro de la cámara de secado	Valores
Temperatura inicial de operación	54,5 °C
Velocidad del aire interno	4 m/s

Elaborado por: LOS AUTORES

Tabla 35. Valores de las condiciones climáticas de Quevedo

Aire externo a condiciones ambientales de Quevedo	Valores
Temperatura media anual	22,6 °C
Humedad media anual	89,41 %
Velocidad de viento media anual	2,0 m/s
Presión atmosférica	14,8 psia

Fuente: [45]

4.1.12. Desarrollo del programa de secado

El programa de secado detallado en la **Tabla 37**, está desarrollado de acuerdo a el tipo de especie y espesor de la madera. En este caso la cámara de secado será utilizada para la madera de Balsa (*Ochroma pyramidale*) con un espesor de 2 in con un contenido de humedad inicial de 100 %. De acuerdo al **Anexo 2**, la madera de balsa con un espesor de 2 in requiere un horario sugerido T8-D3S.

Tabla 36. Programa de secado sugerido para la madera de balsa con un espesor de 2 in.

Nombre común	Nombre científico	Horario sugerido en 2" de espesor
Balsa	Ochroma pyramidale	(T8-D3S)

Elaborado por: LOS AUTORES

El programa de secado artificial T8-D3S, define las temperaturas de operación requeridas según el contenido de humedad que presenta la madera de balsa.

El contenido de humedad inicial es de 100 % y se requiere secar al 12 %, por tanto, la **Tabla 37**, presenta las temperaturas y humedades relativa y de equilibrio, según el contenido de humedad que presente la madera de balsa en el proceso.

Tabla 37. Programa de secado artificial para madera de balsa con espesor de 2in

Paso	Contenido de humedad [%]	Temperatura [°C]		Humedad [%]	
		B. Seco	B. Húmedo	Relativa	Equilibrio
1	100-50	54,5	51,5	86	16,2
2	50-40	54,5	50,5	81	14,3
3	40-35	54,5	48,5	71	11,5
4	35-30	54,5	46	62	9,6
5	30-25	60	49	55	8
6	25-20	65,5	51,5	49	6,8
7	20-15	71	54,5	43	5,8
8	15-12	82	54,5	26	3,5

Elaborado por: LOS AUTORES

4.1.13. Cálculos térmicos de la cámara de secado.

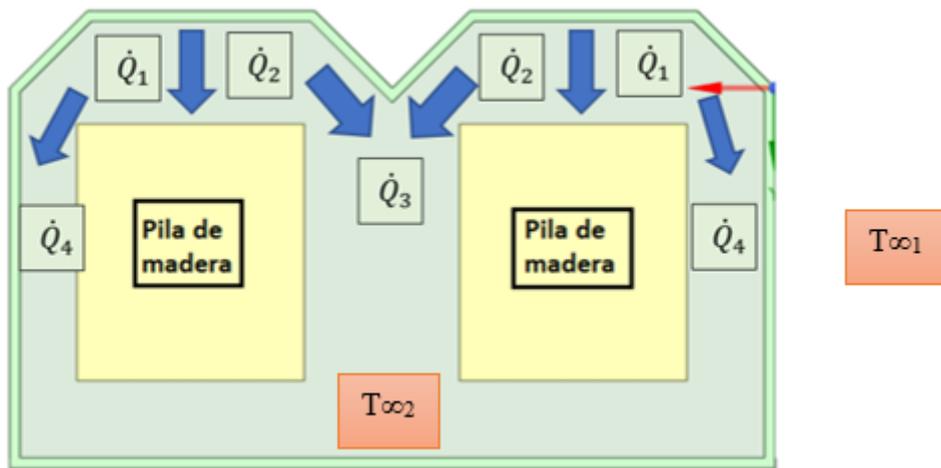
Para determinar el consumo de energía térmica en el proceso de secado de la madera de balsa, se requiere identificar y calcular el requerimiento térmico de los elementos que la componen.

Este proceso consta de dos etapas, las corresponden al periodo de calentamiento de la cámara de secado y el periodo de operación. Estos periodos constan de una suma de los siguientes requerimientos:

Fase de calentamiento inicial de la cámara térmica, se trata de elevar la temperatura del ambiente dentro de la cámara de secado ($22,6\text{ }^{\circ}\text{C}$), hasta alcanzar la temperatura inicial de operación descrita en el programa de secado elaborado para madera de balsa con un espesor de 2 in ($54,5\text{ }^{\circ}\text{C}$).

- Flujo de calor para calentamiento de la madera de balsa húmeda. (\dot{Q}_1)
- Flujo de calor para calentamiento de los espaciadores. (\dot{Q}_2)
- Flujo de calor para elevar la temperatura del aire en el interior de la cámara térmica desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de operación. (\dot{Q}_3)
- Flujo de calor para calentar la estructura del horno. (\dot{Q}_4)

Ilustración 40. Flujos de calor necesarios para calentar la cámara de secado



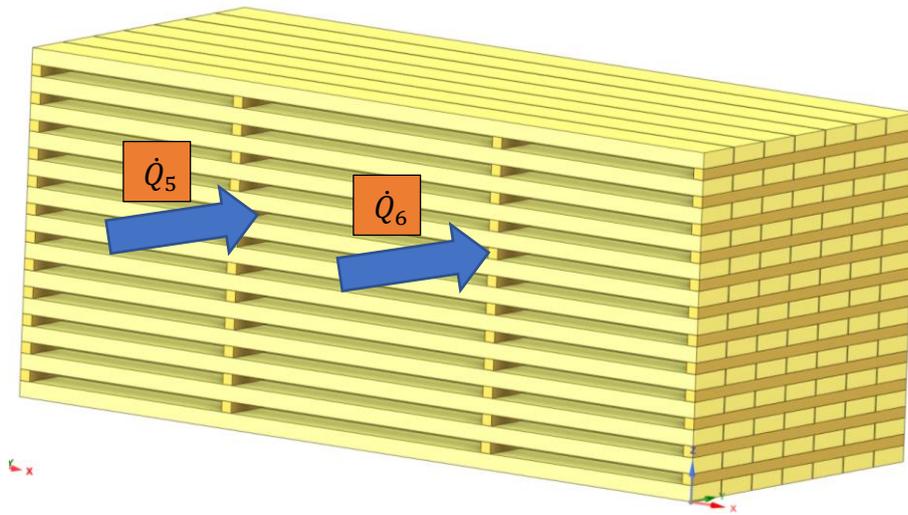
Fuente: SOLIDWORKS

Elaborado por: LOS AUTORES

Fase de operación de la cámara de secado.

- Flujo de calor que se requiere recuperar por pérdidas en las paredes de la estructura. (\dot{Q}_5)
- Flujo de calor para evaporar el agua libre de la madera de balsa (\dot{Q}_6)
- Flujo de calor para evaporar el agua de constitución de la madera de balsa. (\dot{Q}_7)

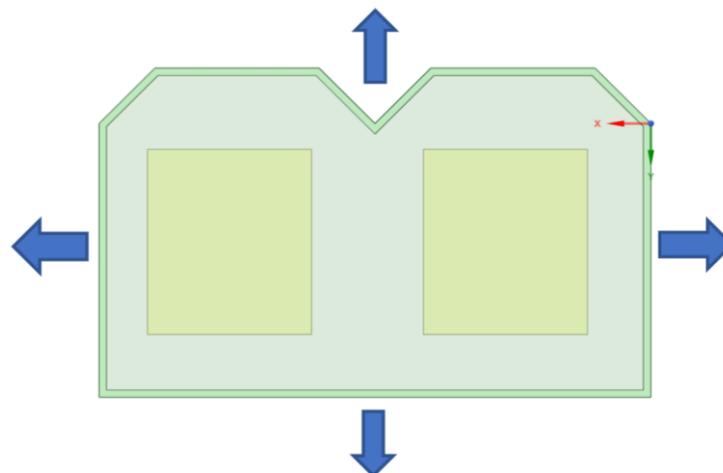
Ilustración 41. Flujos de calor para evaporar el agua en la madera



Fuente: SOLIDWORKS

Elaborado por: LOS AUTORES

Ilustración 42. Flujo de calor perdido en las paredes



Fuente: SOLIDWORKS

Elaborado por: LOS AUTORES

4.1.13.1. Flujo de calor para calentamiento de la madera húmeda

El flujo de calor requerido por la cámara de secado para evaporar el agua en la madera de balsa, se calcula en las dos fases, debido a que, en la fase de calentamiento pierde una cantidad de humedad, siendo un mínimo porcentaje en comparación con la fase de operación.

Para el cálculo se establece la **Ecuación 12**:

$$\dot{Q}_1 = \frac{V_{mb} * \rho_{mb} * C_p * \Delta T}{t_{cal}}$$

Donde:

V_{mb} : Volumen de la madera de balsa

ρ_{mb} : Densidad de la madera de balsa

C_p : Calor específico de la madera de balsa húmeda

ΔT : Diferencia de temperatura desde la ambiental hasta la de operación

t_{cal} : Tiempo de calentamiento

Para proceder al cálculo de este calor primero se calcula el valor del volumen neto de madera que ingresa al horno. Considerando las dimensiones de cada tablón se tiene:

$$v_t = (2,5 * 0,05 * 0,15) m^3 = 0,01875 \frac{m^3}{tablón}$$
$$v_{mb} = 0,0375 \frac{m^3}{tablón} * 1092 \text{ tablones} = 20,47 m^3$$

A continuación, se procede al cálculo del calor específico para madera seca, puesto que, está en función de la temperatura, para trabajar con un valor intermedio de c_p . Que se calcula utilizando la temperatura promedio entre el ambiente y la temperatura inicial.

$$C_{po} = 0,1031 + 0,3867 * 10^{-2} * T_p \quad \text{Ec.(15) [30]}$$

C_{po} : Calor específico para la madera seca

T_p : Temperatura promedio entre ambiente y temperatura inicial de operación

$$C_{po} = 0,1031 + 0,3867 * 10^{-2} * \left(\frac{295,6 + 327,5}{2} \right)$$

$$cp_o = 1,20 \frac{kJ}{kg * K}$$

Conociendo el C_p para madera seca, se procede al cálculo del calor específico en madera húmeda.

$$C_{pm} = \frac{(cp_o + 0,01 * CH * C_{pw})}{(1 + 0,01 * CH)} \left[\frac{kJ}{kg * K} \right] \quad \text{Ec.(16) [30]}$$

C_{pm} : Calor específico en madera húmeda

CH: Contenido de humedad de la madera verde

C_{pw} : Calor específico del agua

$$C_{pm} = \frac{(1,20 + 0,01 * 100 * 4,19)}{(1 + 0,01 * 100)} \left[\frac{kJ}{kg * K} \right]$$

$$C_{pm} = 2,755 \frac{kJ}{kg * K}$$

Se procede a calcular el tiempo de calentamiento que requiere la cámara de secado para llegar de la temperatura ambiente a la temperatura inicial de operación, de acuerdo a la **Ecuación 13**.

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

$$t_{cal} = \frac{54,5 \text{ } ^\circ\text{C} - 22,6 \text{ } ^\circ\text{C}}{5 \frac{^\circ\text{C}}{h}}$$

$$t_{cal} = 6,38 \text{ h} = 22968 \text{ s}$$

Teniendo todos los parámetros se procede a calcular el flujo de calor requerido para aumentar la temperatura del ambiente a la temperatura inicial de operación.

$$\dot{Q}_1 = \frac{20,47 \text{ m}^3 * 340 \left(\frac{kg}{m^3} \right) * 2,755 \left(\frac{kJ}{kg * K} \right) * (327,5 - 295,6)(K)}{22968 \text{ seg}}$$

$$\dot{Q}_1 = 26,63 \text{ kW}$$

4.1.13.2. Flujo de calor para calentamiento de los espaciadores

Los espaciadores más utilizados son de madera coníferas, siendo el pino la más habitual para el secado de madera. Estos presentaran un CH del 10 %, para que no ocurran cambios de dimensiones durante el proceso de secado.

De la **Tabla 3** se obtuvo un espesor de 35 mm, el largo del espaciador será de 1,1 m, ya que es la longitud requerida para acomodar una fila del paquete de madera, por último, el ancho del espaciador será el mismo del espesor. por lo tanto, se procede al cálculo del volumen ocupado por los espaciadores en la cámara. Más los espaciadores entre paquetes que miden 50 mm de espesor, 50 mm de ancho y un largo de 2,2 m.

$$v_e = a_e * e_e * l_e \quad \text{Ec.(17)}$$

v_e : Volumen de los espaciadores

a_e : Ancho de los espaciadores

e_e : Espesor de los espaciadores

l_e : Largo de los espaciadores

$$v_{e1} = (0,035 * 0,035 * 1,1) m^3 = 1,35 * 10^{-3} \frac{m^3}{\text{espaciador}}$$

$$v_{e2} = (0,05 * 0,05 * 2,2) m^3 = 5,5 * 10^{-3} \frac{m^3}{\text{espaciador}}$$

$$v_{et} = 1,35 * 10^{-3} \frac{m^3}{\text{espaciador}} * 576 \text{ espaciadores} + 5,5 * 10^{-3} \frac{m^3}{\text{espaciador}} * 24 \text{ espaciadores} = 0,912 m^3$$

Usando la **Ecuación 12** de calentamiento de la madera y los cálculos realizados anteriormente se tiene:

$$\dot{Q}_2 = \frac{0,912 m^3 * 340 \left(\frac{kg}{m^3}\right) * 1,34 \left(\frac{kJ}{kg * K}\right) * (327,5 - 295,6)(K)}{22968 s}$$

$$\dot{Q}_2 = 0,577 kW$$

4.1.13.3. Flujo de calor para elevar la temperatura del aire en el interior de la cámara térmica desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de operación. (\dot{Q}_3)

En el momento que la cámara de secado comienza a operar, en su interior presenta las condiciones ambientales de la zona, por lo tanto, la masa de aire en el interior requiere llegar a las condiciones de operación.

$$\dot{Q}_3 = \frac{m_{air} * (h_2 - h_1)}{t_{cal}} \quad \text{Ec.(18)}$$

Donde:

m_{air} : Masa del aire (kg)

h_2 : Entalpía específica el final del calentamiento de la cámara (kJ/kg)

h_1 : Entalpía específica inicial del calentamiento (kJ/kg)

El volumen de aire en el interior de la cámara de secado es igual al volumen interno de la cámara, donde se descuenta el volumen de la madera y los espaciadores, resultando la siguiente ecuación:

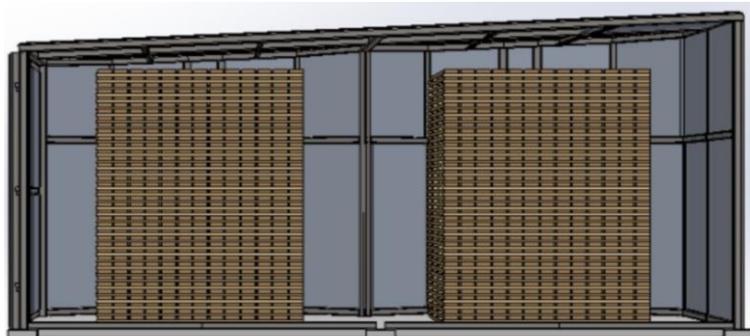
$$V_{air} = V_{i.h.} - V_m \quad \text{Ec.(19)}$$

V_{air} : Volumen del aire dentro de la cámara de secado

$V_{i.h.}$: Volumen interno de la cámara de secado

V_m : Volumen total de madera de dentro de la cámara

Ilustración 43. Volumen de aire dentro de la cámara de secado



Fuente: SOLIDWORKS

Elaborado por: LOS AUTORES

$$V_{air} = 120,86 \text{ m}^3 - 21,38 \text{ m}^3$$

$$V_{air} = 99,47 \text{ m}^3$$

Se procede a calcular la entalpía específica al iniciar el calentamiento, donde se utilizan los datos de las condiciones climáticas en Quevedo, establecidos en la **Tabla 22**, utilizando estos datos en una carta psicométrica descrita en el **Anexo 4** se obtiene que:

$$\text{Entalpía específica} \approx \frac{62,3 \text{ kJ}}{\text{kg de aire seco}}$$

Calculada la entalpía se prosigue a calcular la humedad específica con la condición inicial que presenta el aire al interior de la cámara, con la **Ecuación 10**

$$\omega_o = \frac{0,622 * P_v}{P - P_v}$$

Primero se requiere calcular la presión parcial del vapor de agua, usando la **Ecuación 11**:

$$\phi = \frac{P_v}{P_g}$$

Despejando la presión parcial del vapor de agua se obtiene.

$$P_v = \phi e * P_{g1} \quad \text{Ec.(20)}$$

La presión de saturación del agua a la temperatura del aire [P_{g1}], esta presión se dará a partir de la temperatura inicial en el calentamiento (22,6 °C), donde, según la tabla de temperaturas del agua saturada descrita en el **Anexo 4**, utilizando interpolación la presión de saturación será de $P_{g1} = 2,77 \text{ kPa}$.

Donde:

ω_o : Humedad específica a las condiciones de entrada

P : Presión total atmosférica

P_v : Presión parcial del vapor de agua

P_{g1} : Presión saturación del agua a la temperatura del aire de 22,6 °C

ϕe : Humedad relativa a la entrada

$$P_v = 0,894 * 2,77 \text{ kPa}$$

$$P_v = 2,48 \text{ kPa}$$

$$\omega_o = \frac{0,622 * 2,48 \text{ kPa}}{102,04 \text{ kPa} - 2,48 \text{ kPa}}$$

$$\omega_o = 0,0155 \frac{\text{kg}_{\text{vapor de agua}}}{\text{kg}_{\text{aire}}}$$

Contando con la humedad específica del aire, la cual no varía, se procede a calcular la humedad relativa de salida, dada cuando el aire dentro de la cámara llega a su temperatura inicial de operación 54,5 °C.

$$\phi_s = \frac{\omega_o * P_{at}}{(0,622 + \omega_o) * P_{g2}} \quad \text{Ec.(21)}$$

Donde:

ϕ_s : Humedad relativa a la salida

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

P_{at} : Presión total atmosférica

P_{g2} : Presión de saturación del agua a la temperatura de 54,5 °C

En este caso cuando la temperatura alcanza los 54,5 °C, la presión de saturación del agua a la temperatura del aire es $P_{g2} = 15,42 \text{ kPa}$

$$\phi_s = \frac{0,0155 \frac{\text{kg}_{\text{vapor de agua}}}{\text{kg}_{\text{aire}}} * 102,04 \text{ kPa}}{\left(0,622 + 0,0155 \frac{\text{kg}_{\text{vapor de agua}}}{\text{kg}_{\text{aire}}}\right) * 15,42 \text{ kPa}}$$

$$\phi_s \approx 16 \%$$

La entalpía específica al llegar a la temperatura de calentamiento 54,5 °C, utilizando la carta psicométrica del **Anexo 4** es:

$$\text{Entalpia especifica} \approx \frac{97 \text{ kJ}}{\text{kg de aire seco}}$$

Con la ecuación para gases ideales se procede al cálculo de masa de aire dentro de la cámara de secado.

$$m_{air} = \frac{P_{at} * V_{air}}{R * T_{cal}} \quad \text{Ec.(22) [35]}$$

$$m = \frac{102,04 \text{ kPa} * 99,48 \text{ m}^3}{0,2870 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}} * 327,5 \text{ K}}$$

$$m = 108 \text{ kg}$$

Por lo tanto, el flujo de calor para elevar la temperatura del aire en el interior de la cámara térmica desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de operación, es igual a:

$$\dot{Q}_3 = \frac{108 \text{ kg} * (97 - 62,3) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{22968 \text{ s}}$$

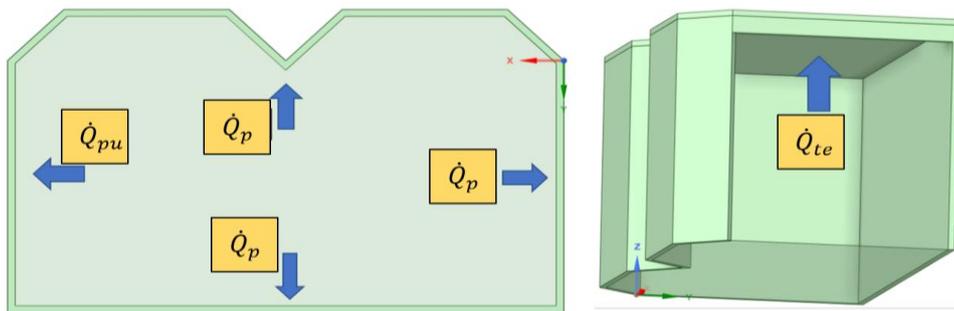
$$\dot{Q}_3 = 0,16 \text{ kW}$$

4.1.13.4. Flujo de calor para calentar la estructura del horno.

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

$$\dot{Q}_4 = \dot{Q}_p + \dot{Q}_{te} + \dot{Q}_{pu} \quad \text{Ec.(23)}$$

Ilustración 44. Distribución de flujos de calor para calentar la estructura



a) Vista superior

b) Vista 3D

Fuente: SOLIDWORKS

Elaborado por: LOS AUTORES

Donde:

\dot{Q}_4 : Flujo de calor para calentar la estructura

\dot{Q}_p : Flujo de calor para calentar las paredes de la cámara

\dot{Q}_{Te} : Flujo de calor para calentar el techado de la cámara

\dot{Q}_{Pu} : Flujo de calor para calentar las puertas de la cámara

El aire fuera de la cámara es de 22,6 °C y el aire caliente dentro de la cámara es de 54,5 °C, se supone que los materiales consiguen una temperatura promedio $T_{pm.c}$

$T_{pm.c}$: Temperatura promedio de calentamiento de la estructura

$$T_{pm} = \frac{327,5 + 295,6}{2} [K]$$

$$T_{mch} = 311,5 K$$

Con estos datos elaborará la **Tabla 38**. donde se calcularán los flujos de calor requeridos para calentar las paredes de la cámara de secado, utilizando la **Ecuación 12**

$$\dot{Q} = \frac{V_m * \rho_m * Cp * \Delta T}{t_{cal}}$$

Tabla 38. *Flujos de calor de los materiales que componen las paredes de la cámara de secado.*

	<i>Volumen</i> [m ³]	<i>Calor específico</i> [$\frac{kJ}{kg * K}$]	<i>Densidad</i> [$\frac{kg}{m^3}$]	<i>Flujo de calor</i> [kW]
Recubrimiento interno de aluminio en las paredes	0,15	0,88	2700	0,246
Recubrimiento intermedio de lana de vidrio	7,58	0,835	48	0,21
Recubrimiento externo de planchas galvanizadas	0,026	0,45	7850	0,06

Elaborado por: LOS AUTORES

Por lo tanto, el flujo de calor que requieren las paredes en la etapa de calentamiento es:

$$\dot{Q}_p = (0,246 + 0,21 + 0,06) \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_p = 0,516 \text{ kW}$$

Se prosigue al cálculo del flujo de calor para calentar el techado de la cámara, donde se tiene los siguientes resultados en la **Tabla 39**.

Tabla 39. Flujos de calor de los materiales que componen el techado de la cámara de secado.

	Volumen [m ³]	Calor específico [$\frac{kJ}{kg * K}$]	Densidad [$\frac{kg}{m^3}$]	Flujo de calor [kg]
Recubrimiento interno de aluminio del techado	0,06	0,88	2700	0,1
Material aislante lana de vidrio	3,18	0,835	48	0,088
Recubrimiento externo planchas de techo galvanizado	0,011	0,45	7850	0,026

Elaborado por: LOS AUTORES

Se procede a sumar los flujos de calor obtenidos en la **Tabla 39**, obteniendo el flujo de calor para calentar el techo de la cámara de secado.

$$\dot{Q}_{Te} = (0,1 + 0,088 + 0,026) \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{Te} = 0,214 \text{ kW}$$

Y por último se calcularán los flujos de calor para calentar las puertas de la cámara de secado. Resumidos en la **Tabla 40**.

Tabla 40. Flujos de calor para calentar los materiales que conforman las puertas de la cámara de secado

	Volumen [m ³]	Calor específico [$\frac{kJ}{kg * K}$]	Densidad [$\frac{kg}{m^3}$]	Flujo de calor [kW]
Recubrimiento interno de aluminio del techado	0,013	0,88	2700	0,021
Material aislante lana de vidrio	0,67	0,835	48	0,018
Recubrimiento externo planchas de techo galvanizado	0,0023	0,45	7850	0,006

Elaborado por: LOS AUTORES

$$\dot{Q}_{Pu} = (0,021 + 0,018 + 0,006) kW$$

$$\dot{Q}_{Pu} = 0,045 kW$$

Contando con los flujos de calor requeridos por paredes, techado y puertas se procede a sumar para obtener el flujo de calor requerido para calentar la estructura.

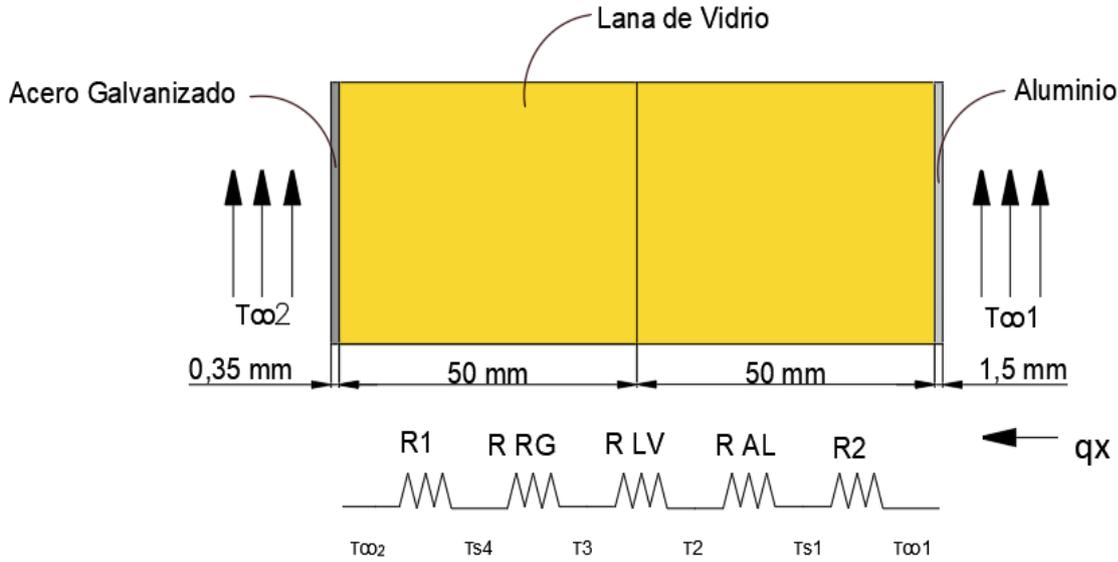
$$\dot{Q}_4 = (0,516 + 0,214 + 0,045) kW$$

$$\dot{Q}_4 = 0,775 kW$$

4.1.13.5. Flujo de calor que se requiere recuperar por pérdidas en las paredes de la estructura.

El diseño ideal para una cámara de secado consiste en que no existan pérdidas de calor, sin embargo, esto es inevitable en la vida real, es necesario conocer el calor perdido por las paredes, con el fin de compensar estas pérdidas con un flujo mayor de calor.

Ilustración 45. Diagrama de resistencias de los materiales que componen las paredes.



Fuente: SOLIDWORKS

Elaborado por: LOS AUTORES

Análisis de resistencia térmica en las paredes laterales.

$$q_{p1} = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{[(R_1) + (R_{rg}) + (R_{lv}) + (R_{al}) + (R_2)]} \quad \text{Ec. (24)}$$

$$q_{p1} = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{\left[\left(\frac{1}{h_5 * A} \right) + \left(\frac{l_4}{k_4 * A} \right) + \left(\frac{l_3}{k_3 * A} \right) + \left(\frac{l_2}{k_2 * A} \right) + \left(\frac{1}{h_1 * A} \right) \right]} \quad \text{Ec. (25)}$$

Donde:

q_{p1} : Calor perdido por pared 1

R_1 : Resistencia producida por la convección del aire exterior

R_{rg} : Resistencia producida por el revestimiento galvanizado

R_{lv} : Resistencia producida por la lana de vidrio

R_{al} : Resistencia producida por el aluminio

R_2 : Resistencia producida por la convección del aire interior

Se comenzará, calculando los coeficientes de convección del ambiente exterior e interior de la cámara de secado. El coeficiente de convección en el exterior de la cámara de secado depende de las condiciones climáticas de Quevedo, descritas en la **Tabla 27**.

$$T_{\infty 2} = 22,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$V_{\text{aire}} = 2 \text{ m/s}$$

Como no se conoce inicialmente la temperatura exterior en las planchas de acero galvanizado, se asume que la temperatura de capa límite exterior es de 25 °C.

$T_{c.l.e.}$: Temperatura de la capa límite exterior

$$T_{c.l.e.} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Donde la tabla de propiedades del aire a la presión de 1 atm, descrita en el **Anexo 5**, con la temperatura de la capa límite del aire, se pueden conocer los siguientes parámetros descritos en la **Tabla 41**:

Tabla 41. Propiedades del aire a la presión de 1atm y una temperatura de 25 °C

$T_{c.l.e.}$ [K]	$\nu * 10^{-6}$ [m ² /s]	$\alpha * 10^{-6}$ [m ² /s]	K [W/m * K]	Pr
298	15,62 * 10 ⁻⁶	21,41 * 10 ⁻⁶	0,02551	0,7296

Elaborado por: LOS AUTORES

A partir de estos datos se procede con el cálculo de los parámetros adimensionales que están involucrados en la transferencia de calor convectiva del aire exterior sobre la pared de la cámara de secado. Procediendo al cálculo de los números de Reynolds y Nusselt, utilizando las siguientes ecuaciones:

- Número de Reynolds

$$R_{eL} = \frac{u_{\infty} * L}{\nu} \quad \text{Ec. (26)}$$

$$R_{eL} = \frac{2,0 \text{ m/s} * 7,4 \text{ m}}{15,62 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}}$$

$$R_{eL} = 947503,2$$

- Número de Nusselt promedio para un flujo turbulento.

$$\overline{Nu}_L = (0,037 * R_{eL}^{0.8} - 871) * Pr^{1/3} \quad \text{Ec. (27)}$$

\overline{Nu}_L = Numero de Nusselt promedio

$$\overline{Nu_L} = (0,037 * 947503,2^{0.8} - 871) * 0,7296^{1/3}$$

$$\overline{Nu_L} = 1228,8$$

Contando con estos parámetros se procede a calcular el coeficiente convectivo de transferencia de calor en función de la temperatura de la capa límite de aire en el exterior a 28,3°C, mediante la siguiente ecuación:

$$h_e = \frac{Nu_L * K}{L} \quad \text{Ec. (28)}$$

$h_e =$ Coeficiente convectivo de transferencia de calor exterior $\left(\frac{W}{m^2 * K}\right)$

$$h_e = \frac{1228,8 * 0,02551 \left(\frac{W}{m * K}\right)}{7,4 m}$$

$$h_e = 4,23 \left(\frac{W}{m^2 * K}\right)$$

En el interior de la cámara de secado se produce convección de aire caliente forzado hacia las paredes mediante ventiladores centrífugos, por lo que, procede a realizar un análisis parecido al de las paredes exterior.

$$T_{\infty 1} = 54,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$V_{(av \text{ aire})} = 4 \text{ m/s}$$

Puesto que, en la cámara de secado se requiere una temperatura de operación de 54,5 °C, pero como no se conoce la temperatura en el interior de la cámara en las planchas de aluminio, se asume que la temperatura de capa límite interior es de 53 °C.

$T_{c.l.i.}$: Temperatura de capa límite interior

$$T_{c.l.i.} = 53 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Tabla 42. Propiedades del aire a la presión de 1atm y una temperatura de 53 °C

T_{f5}	$\nu * 10^{-6}$	$\alpha * 10^{-6}$	K	Pr
[K]	$[m^2/s]$	$[m^2/s]$	$[W/m * K]$	
326	$18,27 * 10^{-6}$	$25,30 * 10^{-6}$	0,02756	0,7220

Elaborado por: LOS AUTORES

Ahora se procede al cálculo de los números de Reynolds y Nusselt, utilizando las siguientes ecuaciones:

➤ Número de Reynolds

$$R_{eL} = \frac{4 \text{ m/s} * 7,4 \text{ m}}{18,27 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}}$$

$$R_{eL} = 1620142,31$$

Número de Nusselt para un flujo turbulento

$$\overline{Nu}_L = (0,037 * R_{eL}^{0,8} - 871) * P_r^{1/3}$$

$$\overline{Nu}_L = (0,037 * (1620142,31)^{0,8} - 871) * (0,7220)^{1/3}$$

$$\overline{Nu}_L = 2299,60$$

➤ Coeficiente de convección a la temperatura de película del fluido caliente en la pared 1

$$h_i = \frac{2299,60 * 0,02756 \left(\frac{W}{m^2 * K} \right)}{7,4 \text{ m}}$$

$$h_i = 8,56 \left(\frac{W}{m^2 * K} \right)$$

Una vez identificados los coeficientes de convección producidos por los ambientes a los que están sometidos la pared 1, se procede con el cálculo de las resistencias térmicas que producen los materiales que componen las paredes, para lo cual se requiere los valores de la conductividad térmica de estos descritos en la **Tabla 44**.

Tabla 43. Conductividad térmica de los materiales que conforman las paredes de la cámara de secado.

Material	Conductividad térmica [W/(m * K)]
Aluminio	205
Lana de vidrio	0,04
Recubrimiento metálico galvanizado	47

Elaborado por: LOS AUTORES

Con los valores de la conductividad térmica de los materiales se procede al cálculo de las resistencias térmicas, mediante la siguiente ecuación:

$$R = \frac{l}{A \cdot K} \quad \text{Ec. (29)}$$

Donde:

R : Resistencia térmica de una pared $\left(\frac{K}{W}\right)$

l : espesor del material (m)

A : Área de la pared (m^2)

K : Conductividad térmica del material que esta compuesto la pared

- Resistencia térmica en serie de la pared aluminio

$$R_{al} = \frac{1,5 * 10^{-3} m}{(4 * 7,4) m^2 * 205 \frac{W}{m * K}}$$

$$R_{al} = 2,47 * 10^{-7} \frac{K}{W}$$

- Resistencia térmica en serie lana de vidrio

$$R_{lv} = \frac{0,1 m}{(4 * 7,4) m^2 * 0,04 \frac{W}{m * K}}$$

$$R_{lv} = 0,084 \frac{K}{W}$$

- Resistencia térmica en serio del recubrimiento metálico galvanizado.

$$R_{rg} = \frac{3 * 10^{-4} m}{(4 * 7,4) m^2 * 47 \frac{W}{m * K}}$$

$$R_{rg} = 2,17 * 10^{-7} \frac{K}{W}$$

Según la composición de la pared 1 los materiales forman una resistencia equivalente en serie, procediendo a su cálculo mediante la siguiente ecuación:

$$R_{t1} = R_{al} + R_{lv} + R_{rg}$$

$$R_{t1} = 2,47 * 10^{-7} + 0,084 + 2,17 * 10^{-7} \left[\frac{K}{W} \right]$$

$$R_{t1} = 0,084 \frac{K}{W}$$

➤ Cálculo del calor perdido por la pared lateral 1

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

$$q_{p1} = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{\left[\left(\frac{1}{h_e * A} \right) + R_{al} + R_{lv} + R_{rg} + \left(\frac{1}{h_i * A} \right) \right]}$$

$$q_{p1} = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{\left[\left(\frac{1}{h_e * A} \right) + R_{t1} + \left(\frac{1}{h_i * A} \right) \right]}$$

$$q_{p1} = \frac{327,5 - 295,6 [K]}{\left[\left(\frac{1}{4,23 \frac{W}{m^2 * K} * 4 m * 7,4 m} \right) + 0,084 \frac{K}{W} + \left(\frac{1}{8,56 \frac{W}{m^2 * K} * 4 m * 7,4 m} \right) \right]}$$

$$q_{p1} = 332,5 W$$

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

$$q_{p1} = h_e * A * (T_{s,rg} - T_{\infty 2}) \quad \text{Ec. (30)}$$

➤ Temperatura exterior

$$T_{s,rg} = \frac{q_{p1}}{h_e * A} + T_{\infty 2} \quad \text{Ec. (31)}$$

$$T_{s,rg} = \left[\frac{332,5 W}{4,23 \left(\frac{W}{m^2 * K} \right) * 29,6 m^2} \right] + 295,6 K$$

$$T_{s,rg} = 298,2 K$$

$$T_{s,rg} = 25,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

➤ Temperatura interior

$$q_{p1} = h_i * A * (T_{\infty 1} - T_{s,al})$$

$$T_{s,al} = T_{\infty 1} - \frac{q_{p1}}{h_i * A}$$

$$T_{s,al} = 327,5 \text{ K} - \left[\frac{332,5 \text{ W}}{8,56 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 * \text{K}} * 29,6 \text{ m}^2} \right]$$

$$T_{s,al} = 326,2 \text{ K}$$

$$T_{s,al} = 53,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

En la **Tabla 45**, se detalla todos los parámetros requeridos para identificar los coeficientes de convección para las temperaturas de la capa límite en las superficies externas e internas.

Tabla 44. Coeficientes de convección para las temperaturas de la capa límite en las superficies externas e internas.

Parámetros	Unidad de medición	Exterior	Interior
Temperatura	$^\circ\text{C}$	22,6	54,5
Temperatura superficial de la pared	$^\circ\text{C}$	25,2	53,2
Temperatura de la capa límite	$^\circ\text{C}$	25	53
Conductividad térmica	$\text{W}/\text{m} * \text{K}$	0,02551	0,02762
Difusividad térmica	m^2/s^2	$2,141 * 10^{-5}$	$2,541 * 10^{-5}$
Viscosidad cinemática	m^2/s	$1,56 * 10^{-5}$	$1,835 * 10^{-5}$
Número de Prandtl	Adimensional	0,7296	0,7218
Número de Reynolds	Adimensional	947503,2	1620142,31
Número de Nusselt	Adimensional	1228,8	2299,6
Coeficientes de convección	$\text{W}/\text{m}^2 * \text{K}$	4,23	8,56

Elaborado por: LOS AUTORES

Ahora se procede a calcular la pérdida de calor que realmente presenta la pared 1.

$$q_{p1} = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{\left[\left(\frac{1}{h_i * A} \right) + R_{t1} + \left(\frac{1}{h_e * A} \right) \right]}$$

$$q_{p1} = \frac{327,5 - 295,6 [K]}{\left[\left(\frac{1}{4,23 \frac{W}{m^2 * K} * 4 m * 7,4 m} \right) + 0,084 \frac{K}{W} + \left(\frac{1}{8,56 \frac{W}{m^2 * K} * 4 m * 7,4 m} \right) \right]}$$

$$q_{p1} = 332,52 W$$

Se procede a presentar los resultados de las demás paredes.

➤ Pared 2

Tabla 45. Resumen de parámetros en la pérdida de calor por parte de la pared 2.

Parámetro	Unidad de medición	Valores
Longitud de la pared	m	8,64
Numero de Reynolds exterior	Adimensional	1119170,98
Tipo de fluido	Turbulencia	
Número de Nusselt exterior	Adimensional	1515,91
Coefficiente de convección exterior	$\frac{W}{m^2 * K}$	4,45
Número de Reynolds interior	Adimensional	1883378,75
Tipo de fluido	Turbulento	
Número de Nusselt interior	Adimensional	2693,71
Coefficiente de convección interior	$\frac{W}{m^2 * K}$	8,61
Resistencia de la plancha de aluminio	$\frac{W}{m * K}$	$2.117 * 10^{-7}$
Resistencia de la lana de vidrio	$\frac{W}{m * K}$	0,0723
Resistencia del recubrimiento metálico	$\frac{W}{m * K}$	$1,847 * 10^{-7}$
Calor perdido por la pared 2	W	380,6

Elaborado por: LOS AUTORES

➤ Pared 3

Tabla 46. Resumen de parámetros en la pérdida de calor por parte de la pared 3.

Parámetro	Unidad de medición	Valores
Longitud de la pared	M	3,7
Número de Reynolds exterior	Adimensional	479274,61
Tipo de fluido	-	
Número de Nusselt exterior	Adimensional	382,85
Coefficiente de convección exterior	$\frac{W}{m^2 * K}$	2,62
Número de Reynolds interior	Adimensional	806539,51
Tipo de fluido	-	
Número de Nusselt interior	Adimensional	981,91
Coefficiente de convección interior	$\frac{W}{m^2 * K}$	7,32
Resistencia de la plancha de aluminio	$\frac{W}{m * K}$	$4,944 * 10^{-7}$
Resistencia de la lana de vidrio	$\frac{W}{m * K}$	0,169
Resistencia del recubrimiento metálico	$\frac{W}{m * K}$	$4,3128 * 10^{-7}$
Calor perdido por la pared 3	W	171,06

Elaborado por: LOS AUTORES

➤ Techado

Tabla 47. Resumen de parámetros en la pérdida de calor por parte del techo.

Parámetro	Unidad de medición	Valores
Longitud de la pared	M	7,4
Número de Reynolds exterior	Adimensional	958549,22
Tipo de fluido	Turbulento	
Número de Nusselt exterior	Adimensional	1247,8
Coefficiente de convección exterior	$\frac{W}{m^2 * K}$	4,27
Número de Reynolds interior	Adimensional	1613079,02
Tipo de fluido	Turbulento	
Número de Nusselt Interior	Adimensional	2288,64
Coefficiente de convección interior	$\frac{W}{m^2 * K}$	8,54
Resistencia de la plancha de aluminio	$\frac{W}{m * K}$	$2,301 * 10^{-7}$
Resistencia de la lana de vidrio	$\frac{W}{m * K}$	0,078
Resistencia del recubrimiento metálico	$\frac{W}{m * K}$	$2,007 * 10^{-7}$
Calor perdido por el Techo	W	355,01

Elaborado por: LOS AUTORES

➤ Puerta

Tabla 48. Resumen de parámetros en la pérdida de calor por parte de las puertas.

Parámetro	Unidad de medición	Valores
Longitud de la pared	m	1,85
Número de Reynolds exterior	Adimensional	239637,31
Tipo de fluido	Laminar	
Número de Nusselt Exterior	Adimensional	292,67
Coefficiente de convección exterior	$\frac{W}{m^2 * K}$	4,01
Número de Reynolds interior	Adimensional	403269,75
Tipo de fluido	Laminar	
Número de Nusselt Interior	Adimensional	378,24
Coefficiente de convección interior	$\frac{W}{m^2 * K}$	5,65
Resistencia de la plancha de aluminio	$\frac{W}{m * K}$	$1,098 * 10^{-6}$
Resistencia de la lana de vidrio	$\frac{W}{m * K}$	0,3753
Resistencia del recubrimiento metálico	$\frac{W}{m * K}$	$9,584 * 10^{-7}$
Calor perdido por la puerta	W	81,86

Elaborado por: LOS AUTORES

4.1.13.6. Flujo de calor total que requiere recuperar la cámara de secado por pérdidas en su estructura.

El flujo total de calor que se debe recuperar, es la suma de todas las pérdidas que presenta la cámara de secado en su estructura.

$$\dot{Q}_7 = \dot{Q}_{p1} + \dot{Q}_{p2} + \dot{Q}_{p3} + \dot{Q}_t + 2\dot{Q}_{pu} \quad \text{Ec. (32)}$$

$$\dot{Q}_7 = 332,79 \text{ W} + 380,6 \text{ W} + 171,06 \text{ W} + 355,01 \text{ W} + 2 * 81,86 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_7 = 1,403 \text{ kW}$$

4.1.13.7. Flujos de calor para evaporar el agua de la madera de balsa

Para calcular los flujos de calor que se requieren para evaporar el agua de la madera de balsa se requiere calcular la masa de agua que se evaporará con un CH de 100 % al 30 % (agua libre), y la masa de agua a evaporar en el rango de 30 % al 12 % de CH.

Para identificar la masa de agua a eliminar se deben calcular el peso de la madera en seco (P.S.) y el peso de la madera verde (P.V.). Estas ecuaciones se obtendrán a partir de la

Ecuación 8:

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

$$P.S = \frac{100 * P.V}{C.H + 100} \quad \text{Ec.(33)}$$

$$P.V = \frac{C.H * P.S}{100} + P.S \quad \text{Ec.(34)}$$

Con los pesos de la madera en verde y en seco se procede a calcular la masa de agua que se eliminara en el rango de 100 % a 30 % de contenido de humedad (agua libre), y la masa de agua que se eliminara en el rango de 30 % al 12 % de contenido de humedad (agua de constitución).

$$m_{libre} = P.V_{100\%} - P.V_{30\%}$$

$$m_{const.} = P.V_{30\%} - P.V_{12\%}$$

Tabla 49. Masa de agua a sustraer de la madera de balsa

C.H %	P.V [kg]	P.S [kg]	Masa de agua a retirar [kg]
100	7269,2		-----
30	4724,9	3634,6	2544,3
12	4070,7		654,2

Elaborado por: LOS AUTORES

Con las masas de agua a retirar en las etapas de agua libre y agua de constitución, se prosigue a calcular los calores que se requieren para evaporar el agua en las dos etapas, utilizando el

Anexo 5, donde pueden encontrar las entalpías de evaporación de acuerdo a las temperaturas de bulbo seco del programa de secado en la **Tabla 37**, donde se utilizará la **Ecuación**:

- Calor para evaporar el agua libre (etapa de 100 % hasta 30 % CH)

$$q_{libre} = m_{libre} * (h_{fg@54,5^{\circ}C})$$

$$q_{EV1} = 2544,3 \text{ kg} * 2371,02 \text{ kJ/kg}$$

$$q_{EV1} = 6,03 * 10^6 \text{ kJ}$$

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

$$q_{EV2} = m_{const.} * (h_{fg@82^{\circ}C}) + m_{const.} * (h_{ad})$$

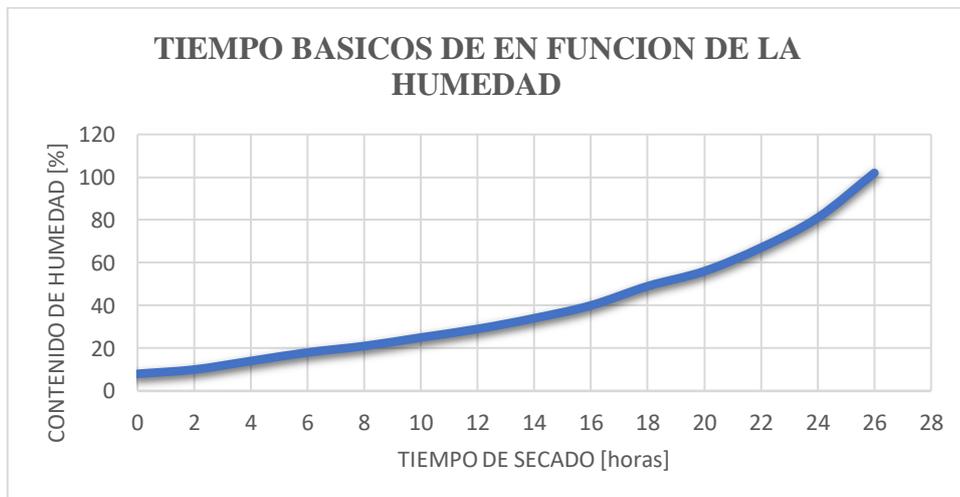
$$q_{EV2} = 654,2 \text{ kg} * 2302,92 \text{ kJ/kg} + 654,2 \text{ Kg} * 4400 \text{ kJ/kg}$$

$$q_{EV2} = 4,3 * 10^6 \text{ kJ}$$

Para conseguir los flujos de calor requeridos para evaporar el agua libre y el agua de constitución en la madera, es necesario establecer los tiempos que toman llegar de un rango de humedad a otro, considerando las temperaturas de bulbo seco ya fijadas en la **Tabla 37**.

Estos tiempos se consiguen a partir del **Ilustración 46** donde se dan los tiempos en función a al contenido de humedad que presenta la madera de balsa.

Ilustración 46. *Tiempos básicos de secado en función del contenido de humedad en maderas blandas extendida hasta un 100% de CH.*



Fuente: LOS AUTORES

Dando como resultado los siguientes tiempos básicos de secado indicados en la **Tabla 51**.

Tabla 50. *Tiempos de secado básico (h) de acuerdo a los contenidos de humedad establecidos en el programa de secado.*

Contenido de humedad [%]	Tiempo básico de secado [h]
100	25,8
50	18,3
40	16,0
35	14,3
30	12,4
25	10,0
20	7,3
15	4,5
12	3,3

Elaborado por: LOS AUTORES

En función a los rangos de humedad establecidos del programa de secado de la **Tabla 37**, se debe calcular el tiempo que se toma en llegar de un porcentaje de humedad a otro. Utilizando la siguiente ecuación:

$$\Delta t_{sec} = t_{C.H.i} - t_{C.H.f} \quad \text{Ec.(35)}$$

En los tiempos que toman en llegar de un porcentaje de humedad a otro, se debe considerar los factores de corrección del tiempo de secado para maderas blandas. Con lo que se da la siguiente **Ecuación 36**.

$$t_{corregido} = \Delta t_{sec} * f_1 * f_2 * f_3 * f_4 * f_5 \quad \text{Ec. (36)}$$

De acuerdo a las **Tabla 5**, hasta la **Tabla 9**, donde se detallan los factores de corrección del tiempo de secado para maderas blandas serán los siguientes:

$$f_1 = 4,68; f_2 = 0,74; f_3 = 1,1; f_4 = 0,78; f_6 = 1,1$$

Dando como resultado la **Tabla 52**, donde se pueden apreciar los valores obtenidos de los tiempos que toma llegar de un porcentaje de contenido de humedad a otro y los tiempos corregidos con los factores.

Tabla 51. *Tiempos que requeridos para llegar de un porcentaje de contenido de humedad a otro y tiempos corregidos*

Contenido de humedad %	Tiempo requerido para llegar de un % a otro h	Tiempo corregido h
100-50	7,5	24,5
50-40	2,3	7,5
40-35	1,7	5,5
35-30	1,9	6,2
30-25	2,4	7,8
25-20	2,7	8,8
20-15	2,8	9,1
15-12	1,2	3,9

Elaborado por: LOS AUTORES

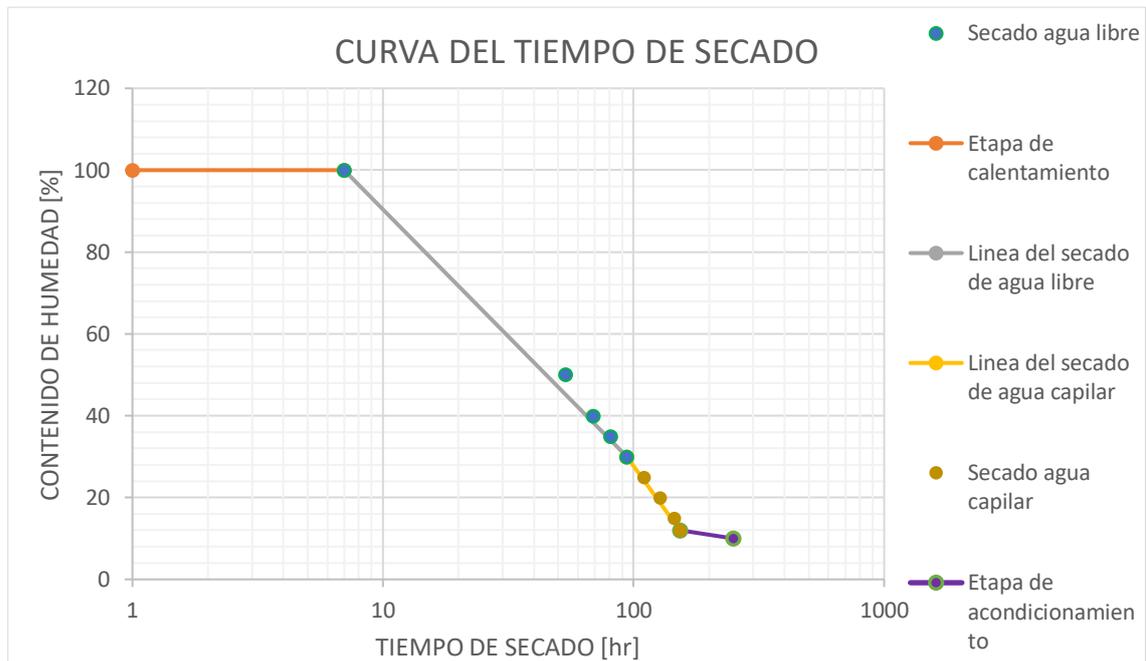
4.1.13.6. Tiempo de acondicionamiento requerido.

El acondicionamiento en la madera a la temperatura final que propone el programa de secado y dos horas por cada centímetro de espesor, teniendo en cuenta que la madera de balsa presenta un espesor de 5 cm, el total de horas de acondicionamiento es igual a $T_{acond.} = 10 h$.

4.1.13.7. Curva de secado para la madera de balsa con un espesor de 2 in

En esta curva se pueden apreciar las etapas del secado de la madera, así como la pérdida de humedad en las etapas de extracción de agua libre y agua de constitución.

Ilustración 47. Curva de tiempo de secado de madera de balsa con 2 in de espesor



Elaborado por: LOS AUTORES

La **Ilustración 49** que durante la etapa de calentamiento la variación de temperatura va de **22,6 °C** a **54,5 °C** y el contenido de humedad no varía ya que es mínimo y tienen una duración de **6,4 h**. Mientras que la etapa de secado se subdivide en dos etapas que son la de extracción de agua libre donde la temperatura se mantiene constante a **54,5 °C** y su contenido de humedad disminuye hasta el **30 %** en **43,8 h**, llegando al punto de saturación de las fibras. Donde se va inicio a un nuevo aumento de temperatura que va de los **54,5 °C** a **82 °C**, siendo este la extracción del agua de constitución donde se llega al contenido de humedad deseado de **12 %** en un transcurso de **29,7 h**. Por último, la etapa de acondicionamiento donde en **10 h** se iguala el contenido de humedad de todos los tablones al **12 %**. Dando un total de **90 h**, para cumplir el proceso de secado.

4.1.13.8. Flujo de calor para evaporar el agua de la madera de balsa

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

$$\dot{Q} = \frac{q_{ev}}{t_{sec}} \quad \text{Ec.(37)}$$

Tabla 52. Flujos de calor necesario para extraer el agua libre y de constitución

	q_{ev} [kJ]	t_{sec} [s]	Q [kW]
Etapa de 100 % hasta el 30 % (agua libre)	$6,03 * 10^6$	$43,8 * 3600$	38,25
Etapa de 30 % hasta el 12 % (agua ligada)	$4,3 * 10^6$	$29,7 * 3600$	41

Elaborado por: LOS AUTORES

4.1.12.9. Flujos de calor requeridos en cada etapa de secado

En la **Tabla 54**, se pueden apreciar un resumen de todos los flujos de calor requeridos para llevar a cabo el proceso de secado de madera de balsa.

Tabla 53. Flujos de calor requeridos en el proceso de secado de la madera de balsa

Etapas	Flujos de calor	Valor
Calentamiento	\dot{Q}_1	26,63 kW
	\dot{Q}_2	0,58 kW
	\dot{Q}_3	0,16 kW
	\dot{Q}_4	0,78 kW
Operación	\dot{Q}_5	1,40 kW
	\dot{Q}_6	38,25 kW
	\dot{Q}_7	41 kW

Elaborado por: LOS AUTORES

En la etapa calentamiento los flujos de calor se requieren de forma simultánea obteniendo un flujo de calentamiento total de $\dot{Q}_{cal} = 28,15 \text{ kW}$, mientras que la etapa de operación se divide en dos la etapa de secado del agua libre y el secado del agua de constitución, a las cuales se les suma el flujo de calor requerido para recuperar las pérdidas por las paredes, obteniendo $\dot{Q}_{a.l.} = 39,65 \text{ kW}$ y $\dot{Q}_{a.c.} = 42,4 \text{ kW}$. Siendo estos flujos los que suministran el sistema de calefacción, de acuerdo a los tiempos obtenidos.

4.1.14. Diseño del serpentín

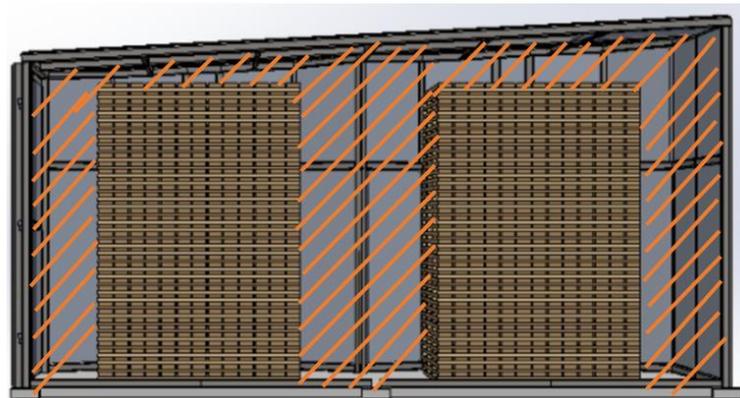
El serpentín es el medio utilizado para transferir el calor a la madera de balsa, dentro de los tubos del serpentín fluye el vapor de agua, este vapor de agua se obtiene en este caso por medio de una caldera, las características de esta se encuentran en el **Anexo 6**.

4.1.14.1. Flujo másico requerido por la cámara de secado

La cámara de secado requiere una velocidad de aire de 4 m/s en el proceso de secado de madera de balsa. El área por la cual debe pasar el flujo de aire es la resta de las caras de las pilas de madera menos el área transversal al flujo de aire. Obteniendo la siguiente ecuación.

$$A_l = A_{t.f} - [n * (14 * A_b + A_s)] \quad \text{Ec. (38)}$$

Ilustración 48. Área transversal al flujo de aire forzado por ventiladores



Fuente: SOLIDWORKS

Elaborado por: LOS AUTORES

Donde:

A_l : Área libre para el paso de aire

$A_{t.f.}$: Área transversal de la cámara de secado al flujo de aire.

A_b : Área ocupada por la madera de balsa.

A_s : Área ocupada por los espaciadores.

n : número de filas de tablonés.

$$A_l = 28,12 \text{ m}^2 - 2 * [39 * (14 * 7,5 * 10^{-3} \text{ m}^2 + 7,7 * 10^{-2} \text{ m}^2)]$$

$$A_l = 13,9 \text{ m}^2$$

Teniendo el valor del área libre por donde va a circular el aire, se procede a calcular el flujo volumétrico.

$$\dot{V} = A_l * v_{air}$$

$$\dot{V} = 13,9 \text{ m}^2 * 3 \text{ m/s}$$

$$\dot{V} = 55,6 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\dot{m}_{air} = \dot{V} * \rho_{air}$$

$$\dot{m}_{air} = 55,6 \text{ m}^3/\text{s} * 1,25 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$\dot{m}_{air} = 69,5 \text{ kg}/\text{s}$$

4.1.14.2. Números de los tubos del serpentín

Los tubos del serpentín son los que transportaran el fluido caliente, el flujo de vapor de agua proveniente de la caldera a $\dot{m}_{v.a.} = 0,22 \text{ kg}/\text{s}$, con una temperatura de $T_{e.v.a.} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ de acuerdo con el **Anexo 5**, para identificar la temperatura de salida del vapor de agua se utiliza el siguiente balance:

$$\dot{Q}_{max} = \dot{m}_{v.a.} * C_{p_{v.a.}}(\Delta T_{v.a.}) \quad \text{Ec. (39) [46]}$$

Donde:

\dot{Q}_{max} : Flujo de calor más elevado durante el proceso de secado de madera de balsa (\dot{Q}_{cal})

$\dot{m}_{v.a.}$: Flujo másico del vapor de aire

$Cp_{v.a.}$: Calor específico del vapor de agua ($1,87 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$) [46]

$$\dot{Q}_{max} = \dot{m}_{v.a.} * Cp_{v.a.} (Te_{v.a.} - Ts_{v.a.})$$

$$Ts_{v.a.} = Te_{v.a.} - \left(\frac{\dot{Q}_{max}}{\dot{m}_{v.a.} * Cp_{v.a.}} \right)$$

$$Ts_{v.a.} = 126 \text{ } ^\circ\text{C} - \left(\frac{42,4 \text{ kW}}{0,22 \text{ kg/s} * 2,03 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}} \right)$$

$$Ts_{v.a.} = 31,06 \text{ } ^\circ\text{C}$$

➤ Temperatura media logarítmica

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)} \quad \text{Ec. (40) [46]}$$

$$\Delta T_1 = Te_{v.a.} - Ts_{aire} \quad \text{Ec. (41) [46]}$$

$$\Delta T_2 = Ts_{v.a.} - Te_{aire} \quad \text{Ec. (42) [46]}$$

Donde:

ΔT_{ml} : diferencia media logarítmica de temperatura

$Te_{v.a.}$: Temperatura de entrada del vapor de agua

Te_{aire} : Temperatura de entrada del aire

$Ts_{v.a.}$: Temperatura de salida del vapor de agua

Ts_{aire} : Temperatura de salida del aire

$$\Delta T_1 = 126 \text{ } ^\circ\text{C} - 54,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_1 = 71,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_2 = 31,58 \text{ } ^\circ\text{C} - 22,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_2 = 8,98 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{8,98 \text{ } ^\circ\text{C} - 71,5 \text{ } ^\circ\text{C}}{\ln(8,98 \text{ } ^\circ\text{C} / 71,5 \text{ } ^\circ\text{C})}$$

$$\Delta T_{ml} = 30,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

➤ Factor de corrección

$$P = \frac{T_{s_{aire}} - T_{e_{aire}}}{T_{e_{v.a.}} - T_{e_{aire}}}$$

$$P = \frac{54,5 \text{ } ^\circ\text{C} - 22,6 \text{ } ^\circ\text{C}}{126 \text{ } ^\circ\text{C} - 22,6 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

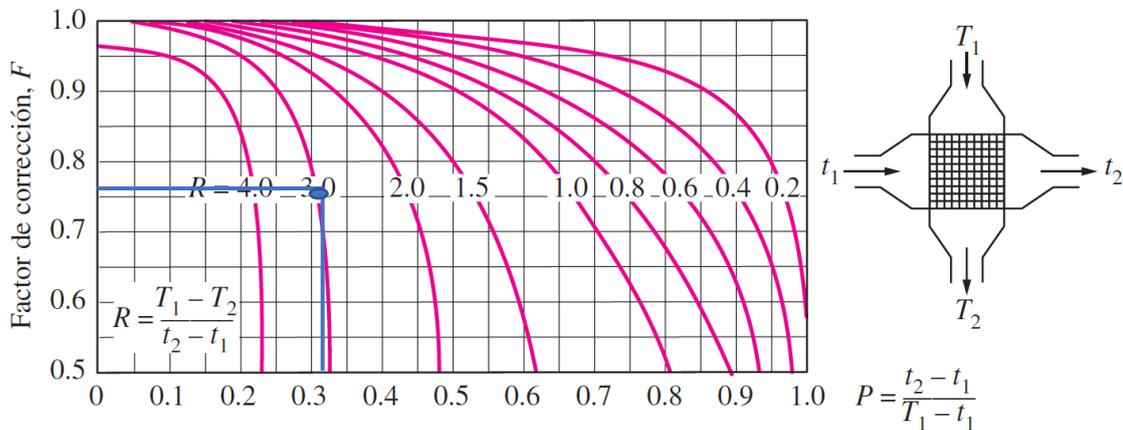
$$P = 0,31$$

$$R = \frac{T_{e_{v.a.}} - T_{s_{v.a.}}}{T_{s_{aire}} - T_{e_{aire}}}$$

$$R = \frac{126 \text{ } ^\circ\text{C} - 31,58 \text{ } ^\circ\text{C}}{54,5 \text{ } ^\circ\text{C} - 22,6 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

$$R = 2,95$$

Ilustración 49. Factor de corrección de flujo cruzado de un solo paso con los dos fluidos de flujo no mezclado



Fuente: [35]

De acuerdo a la ilustración 48, la intersección entre los coeficientes $P = 0,41$ y $R = 2,14$, da como resultado que el factor de corrección es $F = 0,76$.

➤ Área de transferencia de calor

$$\dot{Q} = A * U_o * \Delta T_{ml} * F$$

$$\text{Ec.(41) [46]}$$

Donde:

\dot{Q} : Flujo de calor máximo de operación

A : Área de transferencia de calor

U_o : Coeficiente global de transferencia de calor

ΔT_{ml} : Diferencia media logarítmica de temperatura

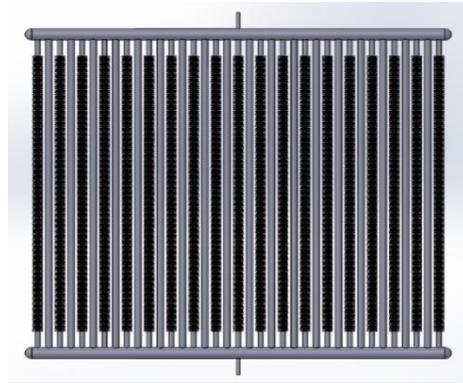
F : Factor de corrección

Los tubos a utilizar serán de una pulgada de cedula 40, y sus dimensiones se encuentran descritas en el **Anexo 1**. El coeficiente global de transferencia de vapor de agua hacia aire en tubos con aletas es de $U_o = 300 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. [46]

$$A = \frac{\dot{Q}}{U_o * \Delta T_{ml} * F}$$
$$A = \frac{42,4 \text{ kW}}{300 \text{ W/m}^2 * ^\circ\text{C} * 22,5 ^\circ\text{C} * 0,76}$$
$$A = 8,26 \text{ m}^2$$
$$A = \pi * D * L * n_{tubos}$$
$$n_{tubos} = \frac{A}{\pi * D * L}$$
$$n_{tubos} = \frac{8,26 \text{ m}^2}{\pi * 0,033 \text{ m} * 2 \text{ m}}$$
$$n_{tubos} \approx 40$$

Se utiliza un factor de seguridad del 10%, con el fin de evitar posibles pérdidas por incrustaciones y taponamientos $n_{tubos} = 44$, Como la cámara se divide en dos secciones se ubican **22 tubos por serpentín**, se tomará una separación entre centros de tubos de **8,5 cm**, con el fin de obtener una mejor distribución del flujo de calor.

Ilustración 50. Diseño del serpentín



Fuente: SOLIDWORKS

Elaborado por: LOS AUTORES

4.1.14.3. Caídas de presión por parte del serpentín y de la pila de madera

- Velocidad máxima del flujo de aire

$$V_{max} = \frac{s_T}{s_T - D} * V_{air}$$

V_{max} : Velocidad máxima del flujo

s_T : Separación entre tubos

D : Diámetro exterior del tubo

V_{air} : Velocidad del fluido

$$V_{max} = \frac{0,085 \text{ m}}{0,085 \text{ m} - 0,033 \text{ m}} * 4 \text{ m/s}$$

$$V_{max} = 6,5 \text{ m/s}$$

- Cálculo de Reynolds para el aire

Número de Reynolds mayores a 10000 se consideran turbulentos

$$Re_D = \frac{\rho_{air} * V_{max} * D}{u_{air}}$$

Re_D : Número de Reynolds al exterior de los tubos

ρ_{air} : Densidad del aire

μ_{air} : Viscosidad dinámica del

$$Re_D = \frac{1,05 \text{ kg/m}^3 * 6,5 \text{ m/s} * 0,033 \text{ m}}{2,181 * 10^{-5}}$$

$$Re_D = 10326 \text{ (flujo turbulento)}$$

- Caída de presión en el intercambiador de calor

La pérdida de presión en el intercambiador de calor, se calcula con la siguiente ecuación.

$$\Delta P_i = N_L * x * \frac{\rho_{air} * V_{max}^2}{2} * f$$

ΔP_i : Caída de presión en el intercambiador

N_L : Número de columnas del arreglo del banco de tubos

x : Factor de correlación [47]

f : Factor de fricción [47]

$$\Delta P_i = 44 * 1,8 * \frac{1,05 \text{ kg/m}^3 * (6,5 \text{ m/s})^2}{2} * 0,2$$

$$\Delta P_i = 351,44 \text{ N/m}^2 = 35,8 \text{ mmca}$$

- Caída de presión en la pila de madera

Para identificar la caída de presión por la pila de madera primero se requiere conocer la temperatura media de operación y la densidad del aire a esa temperatura.

$$T_m = \frac{T_{i,o} + T_{f,o}}{2}$$

$$T_m = \frac{54,5 \text{ }^\circ\text{C} + 82 \text{ }^\circ\text{C}}{2}$$

$$T_m = 68,25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\rho_{air} = 1,239 \left(\frac{288,13}{T_m + 273} \right) \left(\frac{P}{101325} \right)$$

$$\rho_{air} = 1,239 \left(\frac{28,8,13}{68,25 \text{ } ^\circ\text{C} + 273} \right) \left(\frac{102042 \text{ Pa}}{101325} \right)$$

$$\rho_{air} = 1,053 \text{ kg/m}^3$$

$$\Delta P_m = \frac{\lambda * b * v^2 * \rho_{air}}{2 * e}$$

$$\Delta P_m = \frac{0,08 * 4,4 \text{ m} * (1,2 \text{ m/s})^2 * 1,053 \text{ kg/m}^3}{2 * 0,035 \text{ m}}$$

$$\Delta P_m = 7,625 \text{ Pa} = 0,78 \text{ mmca}$$

4.1.14.4. Selección del ventilador

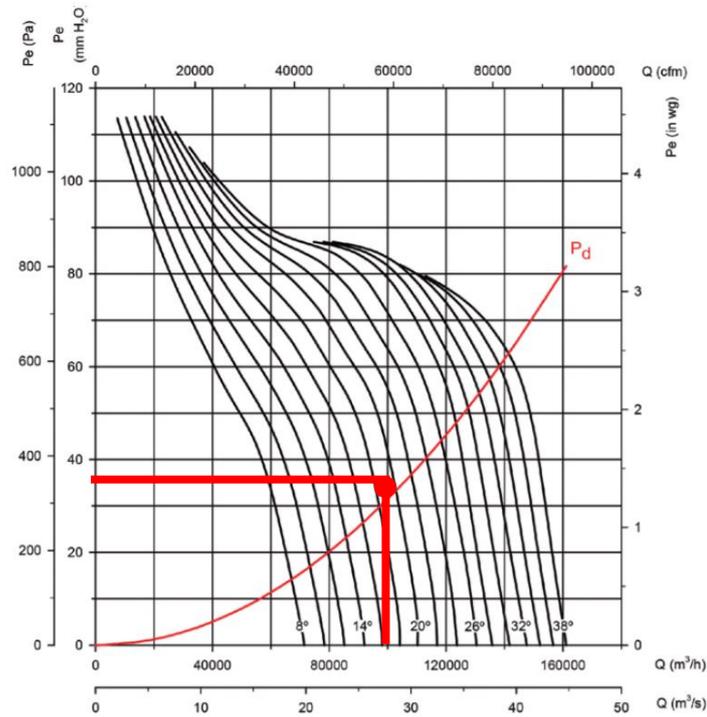
El flujo volumétrico requerido por la cámara de secado se calculó en la sección **4.1.14.1.** dando como resultado **55,6 m³/s**, debido a que se requieren dos ventiladores el flujo volumétrico se divide para dos, dando como resultado **27,8 m³/s**, equivalentes a **100080 m³/h**. A su vez, las caídas de presión en el serpentín y la pila de madera dan un total de **37,6 mmca**. Estos datos sirven para identificar el ventilador de acuerdo a la Ilustración.

Ilustración 51. Curvas de caudal vs caída de presión

Diámetro Hélice (cm): 125

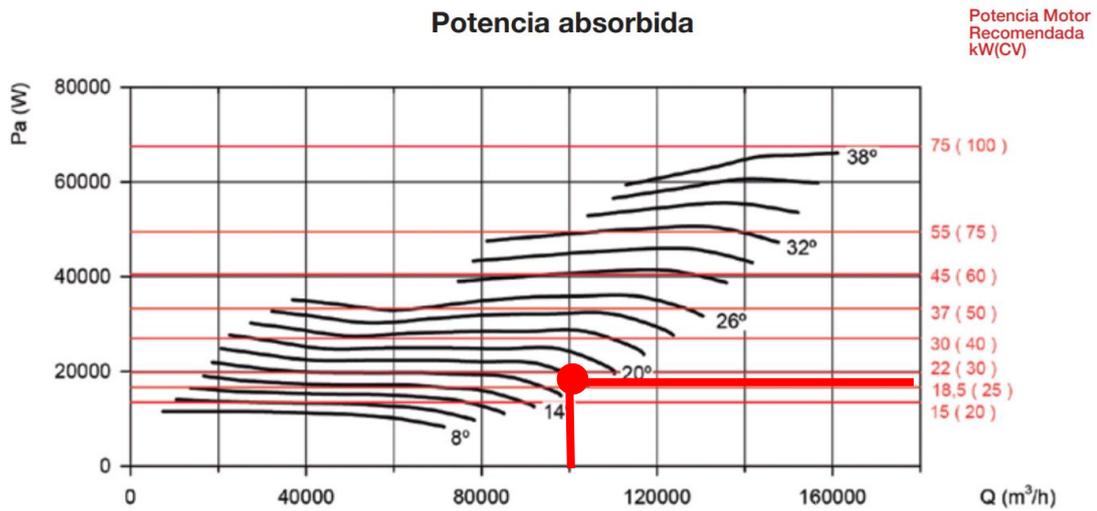
Número de polos: 4

Número de palas: 6



Fuente: [48]

Ilustración 52. Potencia requerida del motor



Fuente: [48]

Ilustración 53. Características del ventilador seleccionado

Características técnicas

Modelo			Velocidad (r/min)	Intensidad máxima admisible (A)			Potencia Instalada (kW)	Caudal máximo (m ³ /h)	Nivel presión sonoro dB(A)
				230V	400V	690V			
HGT	HGTX	125-4T/6-20 IE3	1465	27,90	16,20	15,00	78300	89	
HGT	HGTX	125-4T/6-25 IE3	1470	35,10	20,30	18,50	92000	90	
HGT	HGTX	125-4T/6-30 IE3	1470	41,00	23,80	22,00	98100	90	
HGT	HGTX	125-4T/6-40 IE3	1480	57,10	33,10	30,00	117000	92	
HGT	HGTX	125-4T/6-50 IE3	1480	69,20	40,10	37,00	123700	93	
HGT	HGTX	125-4T/6-60 IE3	1475	80,90	46,90	45,00	136000	94	
HGT	HGTX	125-4T/6-75 IE3	1480	98,60	57,20	55,00	148000	95	
HGT	HGTX	125-4T/6-100 IE3	1485	134,00	77,70	75,00	161000	96	
HGT	HGTX	125-4T/9-25 IE3	1470	35,10	20,30	18,50	79750	88	
HGT	HGTX	125-4T/9-30 IE3	1470	41,00	23,80	22,00	97000	89	
HGT	HGTX	125-4T/9-40 IE3	1480	57,10	33,10	30,00	111200	91	

Fuente: [48]

Para el flujo volumétrico y caída de presión, requeridas en la cámara de secado se obtuvo que, se requiere un ventilador de tipo axial de **seis palas** con un diámetro de hélice de **1,25 m**, el cual, necesita un motor eléctrico con una potencia de **18,5 kW** y **1800 rpm**.

4.1.15. Sistema de transmisión

Con los resultados obtenidos de la potencia del motor de 25 HP y velocidad de 1800 rpm, se procede a seleccionar el tipo de banda más apropiada.

Para este cálculo se consideran las normas ISO en base al diámetro de referencia d_d (antes diámetro primitivo), y desarrollo de referencia L_d (antes desarrollo primitivo L_w).

4.1.15.1. Factor de carga (C_2)

Para la determinación del factor de carga se usa la ilustración 56, para esto mediante la potencia del ventilador y el tiempo de operación del motor, se halla el valor del factor de carga C_2 .

Ilustración 54. Factor de carga C2

jemplo de máquinas accionadas	Factor de carga c_2 para servicio diario (horas)			Factor de carga c_2 para servicio diario (horas)		
	hasta 10	más de 10 hasta 16	a partir de 16	up to 10	más de 10 hasta 16	a partir de 16
Transmisiones ligeras Bombas centrífugas y compresores, byas transportadoras (cargas ligeras) ventiladores y bombas de hasta 7,5 kW	1,1	1,1	1,2	1,1	1,2	1,3
Transmisiones medias Guillotinas, prensas, transportadores de cadena y bya (cargas pesadas), tamices vibradores, generadores y excitadores, amasadoras, máquinas herramienta (tornos, esmeriladoras), lavadoras, impresoras, ventiladores y bombas de más de 7,5 kW	1,1	1,2	1,3	1,2	1,3	1,4

Fuente: [49]

4.1.15.2. Potencia teórica (P_b)

Para hallar la potencia teórica, es necesario conocer la potencia del motor eléctrico que es de 14,9 kW y el factor de carga, obteniendo así:

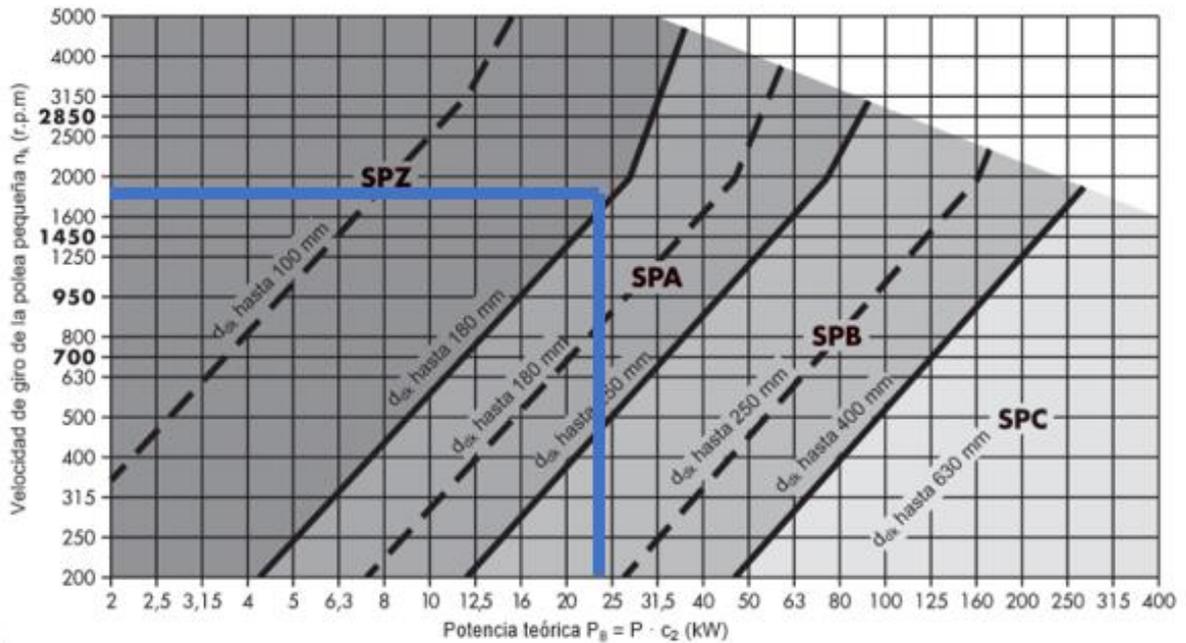
$$P_b = (Pot\ motor) * C_2$$

$$P_b = (18,5\ kW) * 1,3$$

$$P_b = 24,05\ kW$$

4.1.15.3. Selección de perfil de la correa

Ilustración 55. Diagrama de correas trapeciales estrechas de alto rendimiento.



Fuente: [49]

Para $P_b = 24,05 \text{ kW}$ y la velocidad de la correa pequeña $n_1 = 1800 \text{ rpm}$, se seleccionó el perfil de la correa SPZ.

4.1.15.4. Relación de posición

$$i = \frac{n_1}{n_2}$$

$$i = \frac{1800}{1470}$$

$$i = 1,2$$

4.1.15.5. Diámetro referencial de las poleas acanaladas trapeciales

$$d_{d1} = 280$$

Para la determinación de diámetro referencial 2, usamos la siguiente ecuación:

$$d_{d2} = d_{d1} * i$$

$$d_{d2} = 280 * 1,2$$

$$d_{d2} = 336 \text{ mm}$$

Una vez obtenido dicho valor, buscamos en la tabla un valor similar o aproximado el cual nos da que $d_{d2} = 355 \text{ mm}$

Ilustración 56. Poleas acanaladas trapeciales.

Perfil de la correa trapecial	Denominación ISO	-	Y	-	Z	A	B	-	C	-	D	E	Diámetro de referencia d_d		Tolerancia de concentricidad y planitud
	Denominación DIN 2215	5	6	8	10	13	17	20	22	25	32	40	min	máx	
Perfil correa trapecial estrecha	Denominación DIN 7753 Parte 1 e ISO 4184	-	-	-	SPZ	SPA	SPB	-	SPC	-	-	-			
Diámetro de referencia d_d	100	150	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160,0	162,4	0,4
		170	170	170	170	170	170	170	170	170	170	170	170,0	172,7	
		180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180,0	182,9	
		190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190,0	193,0	
		200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200,0	203,2	
		212	212	212	212	212	212	212	212	212	212	212	212,0	215,4	
	200	224	224	224	224	224	224	224	224	224	224	224	224,0	227,6	0,4
		225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225,0	228,6	
		236	236	236	236	236	236	236	236	236	236	236	236,0	239,8	
		250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250,0	254,0	
		265	265	265	265	265	265	265	265	265	265	265	265,0	269,0	
		280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280,0	284,5	
	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300,0	304,8	0,5
		315	315	315	315	315	315	315	315	315	315	315	315,0	320,0	
		335	335	335	335	335	335	335	335	335	335	335	335,0	340,0	
		355	355	355	355	355	355	355	355	355	355	355	355,0	360,7	
		375	375	375	375	375	375	375	375	375	375	375	375,0	380,7	
		395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395,0	400,7	

Fuente: [49]

4.1.15.6. Comprobación de la velocidad de giro de la maquina

$$i' = \frac{d_{d2}}{d_{d1}} = \frac{355 \text{ mm}}{280 \text{ mm}} = 1,19 \quad \text{Si cumple con } i \approx 1,2$$

$$n_2' = \frac{n_1}{i'} = \frac{1800}{1,19} = 1512,6 \quad \text{Si cumple con } n_2 \approx 1470$$

4.1.15.7. Distancia entre ejes (a , selección provisional)

$$d_{d1} = d_{dk} = 280 \text{ mm}$$

$$d_{d2} = d_{dg} = 355 \text{ mm}$$

$$0,7 * (d_{dk} + d_{dg}) < a < 2 * (d_{dk} + d_{dg})$$

$$0,7 * (280 \text{ mm} + 355 \text{ mm}) < a < 2 * (280 \text{ mm} + 355 \text{ mm})$$

$$444,5 < a < 2 * 1270$$

Con los resultados obtenidos se asume un valor de 700 mm para la distancia entre ejes.

4.1.15.8. Desarrollo de referencia de la correa (L_{DTH})

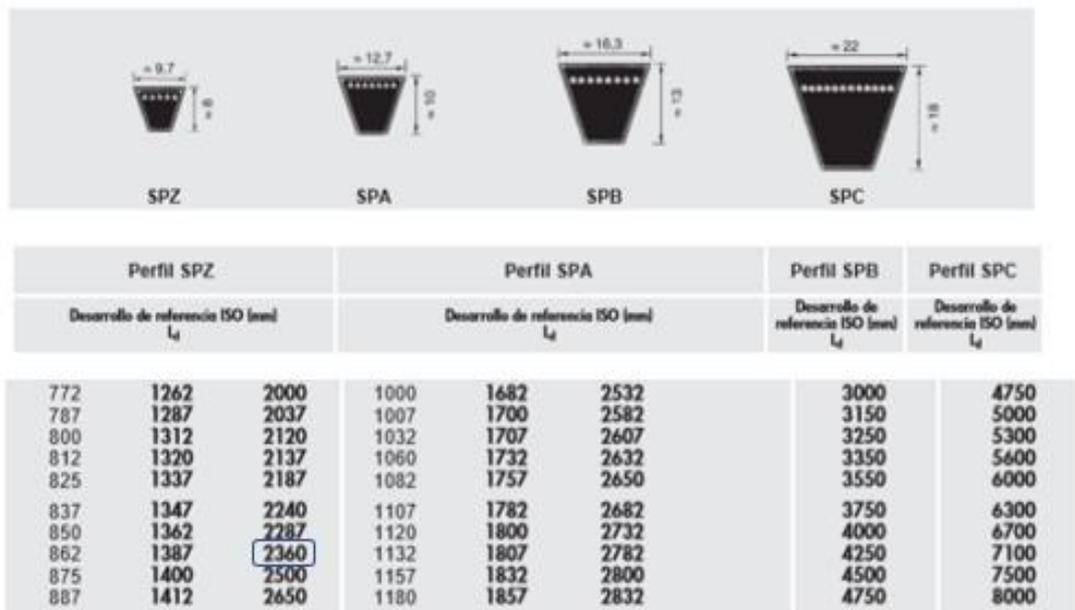
$$L_{DTH} \approx 2a + 1,57 * (d_{dg} + d_{dk}) + \frac{(d_{dg} - d_{dk})^2}{4a}$$

$$L_{DTH} \approx 2(700 \text{ mm}) + 1,57 * (355 \text{ mm} + 280 \text{ mm}) + \frac{(355 \text{ mm} - 280 \text{ mm})^2}{4(700 \text{ mm})}$$

$$L_{DTH} \approx 2398,9 \text{ mm}$$

Con el valor conseguido, mediante la gráfica a continuación se asume la longitud más cercana a la obtenida, siendo este $L_{DTS} = 2360$

Ilustración 57. Desarrollo de referencia



Fuente: [49]

4.1.15.9. Desarrollo entre ejes (a_{nom})

Si $L_{DTS} < L_{DTH}$ $a_{nom} \approx a + \frac{L_{DTS} - L_{DTH}}{2}$

Si $L_{DTS} > L_{DTH}$ $a_{nom} \approx a - \frac{L_{DTS} - L_{DTH}}{2}$

Para nuestro caso:

$$a_{nom} \approx 700 \text{ mm} - \frac{2360 \text{ mm} - 2398,9 \text{ mm}}{2}$$

$$a_{nom} \approx 719,45 \text{ mm}$$

4.1.15.10. Ajuste mínimo x/y de la distancia entre ejes a_{nom} :

Para $L_{DTH} = 2360 \text{ mm}$

Ilustración 58. Ajuste mínimo x/y de la distancia entre ejes.

Desarrollo de referencia (mm)	Ajuste mínimo x (mm) – para tensado o retensado	Ajuste mínimo y (mm) para montaje			
		SPZ, XPZ	SPA, XPA	SPB, XPB	SPC, XPC
487 ≤ 670	10	10	10	—	—
> 670 ≤ 1 000	15	15	15	—	—
> 1 000 ≤ 1 250	20	15	15	—	—
> 1 250 ≤ 1 800	25	20	20	20	—
> 1 800 ≤ 2 240	25	20	20	20	25
> 2 240 ≤ 3 000	35	20	20	20	30
> 3 000 ≤ 4 000	45	20	20	20	30
> 4 000 ≤ 5 000	55	20	20	25	30

Fuente: [49]

4.1.15.11. Arco de brazo y factor de corrección

Se tiene la relación:
$$\frac{(d_{dg} - d_{dk})}{a_{nom}}$$

Para nuestros datos:
$$\frac{(355 - 280)}{719,45} = 0,10$$

Con este valor, obtenemos el valor de β y C_1

Ilustración 59. Arco de brazo y factor de corrección.

$\frac{d_{dg} - d_{dk}}{a_{nom}}$	$\beta =$	C_1
0	180°	1,00
0,05	177°	1,00
0,10	174°	1,00
0,15	171°	1,00
0,20	168°	0,99

Fuente: [49]

4.1.15.12. Factor de desarrollo (C_1)

Ilustración 60. Factor de desarrollo.

Perfil SPZ, XPZ	
Desarrollo de referencia (mm)	c_3
2000	1,04
2120	1,05
2240	1,06
2360	1,07
2500	1,08

Fuente: [49]

4.1.15.13. Potencia Nominal por correa (P_N)

Utilizamos los datos $d_{dk} = d_{d1} = 280 \text{ mm}$, $n_1 = 1800$ y $i = 1,2$

Ilustración 61. Potencia Nominal por correa.

Poleas v (m/s)	n_2 (min^{-1})	Diámetro de referencia de la polea pequeña d_{d1} (mm)														Suplemento de potencia (kW) por correa para i				
		90	100	112	118	125	132	140	150	160	180	200	224	250	280	315	1,01 hasta 1,05	1,06 hasta 1,20	1,27 hasta 1,57	>1,57
700		1,17	1,55	1,90	2,21	2,47	2,72	3,01	3,37	3,73	4,44	5,14	5,97	6,85	7,86	9,01	0,02	0,15	0,21	0,28
950		1,40	1,98	2,57	2,98	3,20	3,53	3,91	4,39	4,96	5,78	6,70	7,79	8,92	10,21	11,69	0,03	0,20	0,29	0,38
1450		2,04	2,70	3,62	4,04	4,53	5,02	5,57	6,25	6,92	8,24	9,52	11,02	12,58	14,30	16,18	0,05	0,31	0,44	0,54
2050		3,14	4,40	5,88	6,60	7,43	8,23	9,13	10,21	11,25	13,21	14,97	16,81	18,43	19,78	20,57	0,09	0,61	0,87	1,07

Fuente: [49]

Realizamos dos interpolaciones dobles:

$$P_N = 15,67 + 0,38 = 16,05 \text{ kW}$$

4.1.15.14. Numero de correas (z)

Para calcular el número de correas empleamos:

$$z = \frac{P_{motor} * C_2}{P_N * C_1 * C_3}$$

$$z = \frac{24,05 \text{ kW} * 1,3}{16,05 \text{ kW} * 1,07 * 0,38}$$

$$z = 4,79 \approx 5$$

Se necesitarán:

1 polea de 280 mm y 5 canales para correa trapezoidal SPZ

1 polea de 355 mm y 5 canales para correa trapezoidal SPZ

4.1.16. Comparaciones de diseño propuesto vs diseño convencional

Los diseños convencionales, generalmente están contruidos de ladrillos y morteros cuyos materiales tienen una mayor resistencia térmica, necesitando un mayor flujo de calor y tiempo para alcanzar la temperatura de operación. De acuerdo, a la investigación realizada por *Coyago y Criollo* se obtuvieron los siguientes resultados para una cámara de secado de madera frondosa de 23 m³. [30]

Ilustración 62. Flujo de calor en la etapa de calentamiento

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

Fuente: [30]

Donde se puede observar claramente que los materiales de composición de la cámara requieren un flujo calorífico de **21, 65 kW**, a comparación de los **0, 78 kW** que necesita la cámara de secado. Las pérdidas de calor presentadas en las paredes de la cámara de secado en la investigación realizada por *Coyago y Criollo* son de: [30]

Ilustración 63. Pérdidas de calor por parte de las paredes durante el proceso de secado de madera

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

Fuente: [30]

Evidenciando que se requiere de **3,4 kW** para, compensar las pérdidas de calor por medio de la pared de concreto y bloque, el diseño propuesto necesita compensaciones de **1,4 kW**.

Los procesos de secado realizados a la madera de balsa con espesor similar al considerado en el estudio, se encuentran en el **Anexo 7**, donde se detalla que en cuatro días se obtuvo un contenido de humedad del 8 %, utilizando temperaturas de operación que inician con **135 °F (57,2 °C)** a **167 °F (75 °C)**. Siendo temperaturas de operación y el tiempo total de secado muy similar al calculado en este estudio.

4.1.17. Costos del proyecto

La cámara de secado está pensada para las pequeñas y medianas empresas por lo que se considera, que el volumen de la madera a secar estará en un rango de $20 m^3$ a $25 m^3$.

A continuación, se analizará la inversión del costo de los componentes principales que conforman esta cámara de secado, que está dividida en tres costos: costos de estructura, costos del sistema de calefacción y costos de equipo auxiliar.

Tabla 54. Costos de Estructura.

Descripción	Cantidad	Precio	Total, USD.
Tubo Estructural Cuadrado 100 MM X 3 MM Longitud 6 m	39	\$ 68,07	\$ 2654,73
Perfil Canal G 100mmX50mmX15X3 Longitud 6 m	6	\$ 33,42	\$ 200,52
Planchas de Dipanel DP5 Galvanue Espesor 0.35 mm Longitud 4 m	34	\$ 22,91	\$ 778,94
Planchas de Aluminio 1220X2440mm	68	\$ 125	\$ 8500
Lana de vidrio 15mX0.6mX0.05m	28	\$ 64,52	\$ 1806,56
Tornillo de acero inoxidable #10 x 3/4 pulgadas (100 unidades)	100	\$ 0,14	\$ 14
Bisagra n°88 4"X4" pasador simple	6	\$ 2,36	\$ 14,16
Electrodo AGA 6011 1/8'' 1 kg	5	\$ 24,55	\$ 24,55
		Total:	\$ 13993,44

Elaborado por: LOS AUTORES

Tabla 55. Costos de Sistema de Calefacción.

Descripción	Cantidad	Precio	Total, USD.
Serpentín	2	\$ 1450	\$ 2900
Ventilador	2	\$ 1350	\$ 2700
		Total:	\$ 5600

Elaborado por: LOS AUTORES

Tabla 56. Costos de Equipo Auxiliar.

Descripción	Cantidad	Precio	Total, USD.
Motor Eléctrico Monofásico 25 HP	2	\$ 1560	\$ 3120
		Total:	\$ 3120

Elaborado por: LOS AUTORES

Tabla 57. Costos de Diseño y Mano de obra.

Descripción	Cantidad	Precio	Total, USD.
Diseño de la cámara	1	\$ 3000	\$ 3000
Mano de obra	1	\$ 2500	\$ 2500
		Total:	\$ 5500

Elaborado por: LOS AUTORES

Tabla 58. Costos Totales

Descripción	Cantidad	Precio	Total, USD.
Costos de Estructura	1	\$ 13993,44	\$ 13993,44
Costos de Sistema de Calefacción	1	\$ 5600	\$ 5600
Costos de Equipo Auxiliar	1	\$ 3120	\$ 3120
Costos de Diseño y Mano de obra	1	\$ 5500	\$ 5500
Total:			\$ 28213,44

Elaborado por: LOS AUTORES

El costo total del proyecto es de \$ 28213,44 donde están involucrados los componentes principales que conforman la cámara de secado, el diseño y la mano de obra.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Los tablonces de madera de balsa con espesor de **5 cm**, un contenido de humedad de **100%** y una densidad inicial de **340 kg/m³**. Presentando calores específicos de **2,75 kJ/kg * K** en madera húmeda y de **1,20 kJ/kg * K** en madera seca. Siendo estos parámetros fundamentales para el cálculo del flujo de calor que requiere la madera para ser calentada y llegar a la temperatura de operación.
- La cámara se diseñó para secar **20,5 m³** de madera de balsa, conformado por dos pilas de madera, donde la disposición de la cámara permite contar con un serpentín y un ventilador propio, obteniendo un flujo de calor directo hacia cada pila. Obteniendo resultados mayores a **5 * 10⁵**, en los números de Reynolds calculados en la capa límite de las paredes y el techado de la cámara de secado.
- De acuerdo al área transversal al flujo del aire caliente se reconoció que para satisfacer las necesidades caloríficas requeridas en el proceso de secado tomando un flujo de calor de diseño de **36,6 kW**, se identificó que cada serpentín cuenta con 22 tubos de una pulgada de diámetro nominal y 2 metros de largo, teniendo un área efectiva de transferencia de calor de **7,13 m²**. El ventilador seleccionado de tipo axial cuenta con seis palas y un diámetro de hélice de **1,25 m**.
- El proceso de secado está constituido por las etapas de calentamiento donde se obtuvo que el flujo requerido es de **28,15 kW** durante un periodo de **6,4 h**, donde la madera, el ambiente interior de la cámara y los elementos que la componen alcanzan la temperatura de operación de **54,5 °C**. Mientras que en la etapa de extracción del agua, se necesita un flujo de **22,68 kW**, para reducir el contenido de humedad del **100%** al **12%**, evaporando un total aproximado de **5 ton** de agua del interior de la madera de balsa en un periodo de tiempo de **73,3 h**. Por último, en la etapa de corrección se debe mantener el flujo de **22,68 kW**, durante **10 h**, para que el contenido de humedad sea igual en todos los tablonces de madera.

- La estructura fue sometida a una combinación de cargas muertas, vivas y ambientales de las cuales se obtuvo que el techado es la parte más crucial de la estructura soportando tensión axial y de flexión que alcanzaron un máximo de **44,9 MPa**, puesto que la estructura está diseñada con acero **AISI 1010** que presenta un límite elástico de **350 MPa** se obtuvo un factor de seguridad óptimo de $n_{min} = 7,78$. Así reconociendo que el diseño de la estructura de seguro y fiable.
- La cámara de secado convencional y el diseño estudiado presentan variaciones significativas en los flujos de calor que requieren para alcanzar la temperatura de operación, el diseño estudiado también presenta una mejora en la disminución de pérdidas de calor por parte de las paredes, presentando una eficiencia de **2,4**. En gran medida, esto se debe a la conductividad térmica de **0,04 W/m * K** de la lana de vidrio, frente a **0,72 W/m * K** que presenta ladrillos refractarios.

5.2. Recomendaciones

- En cuanto a las propiedades requeridas para el estudio del proceso de secado de balsa se recomienda usar los valores obtenidos mediante el estudio, dichos valores son valores pre establecidos y que fueron corroborados a través de esta investigación cumpliendo con los parámetros esperados dentro de este proceso en concreto
- De acuerdo con la relación al volumen a secar dentro de la cámara diseñada, se recomienda este diseño, ya que presentó las condiciones más óptimas en toda su estructura, para conseguir un secado uniforme dentro de esta esta investigación
- Para los componentes del sistema calefactor y de ventilación se recomienda hacer simulaciones para la selección del serpentín y ventilador más adecuado dependiendo los requerimientos de la cámara, para futuros estudios a realizar de este tipo de cámaras de secado.
- En cuanto al comportamiento termodinámico de la madera al secar en relación a la curva humedad – tiempo y la disposición adecuada de la cámara se recomienda el flujo requerido que es de **28,15 kw** durante un periodo de **6,4 h**, donde la madera, el ambiente interior de la cámara y los elementos que componen la cámara alcanzan la temperatura de operación de **54,5 °C** ya que al utilizar dichos valores se está propiciando el proceso más óptimo de acuerdo a lo planteado.
- Para el dimensionamiento óptimo de la estructura y garantías de seguridad se recomienda utilizar una estructura de acero **AISI 1010** que presenta un límite elástico de **350 MPa** dado que dentro de la estructura el techo quien se ve cometido a la mayor tensión axial y flexión cuyo valor es de **44,9 MPa**, teniendo como valor resultado de seguridad óptima $n_{min} = 7,78$. Por lo que se establece un diseño seguro y confiable en la estructura.
- De acuerdo con los resultados obtenidos se recomienda el diseño propuesto, ya que, pese a que el tiempo de secado es el mismo para ambos casos, se encontró una mejora significativa en lo que respecta a los flujos de calor requeridos para alcanzar la

temperatura de operación, así como una mejora en la disminución de pérdidas de calor por parte de las paredes haciendo mucho más óptimo el diseño propuesto en relación con el que se comparó.

CAPÍTULO VI
BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. K. Francis, *Ochroma pyramidale* Cav., Río Piedras, 2000, p. 1.
- [2] I. J. B. Reyes, *Dereterminación de propiedades termofísicas de madera PINUS RADIATA impregnada con material de cambio de fase*, Concepción, 2016.
- [3] X. R. M. Verónica Gallardo Chamorro, *Determinación experimental del comportamiento higrotérmico de ocho especies de maderas.*, Barcelona, 2011.
- [4] P. K. Agnieszka Jankowska, «Determinación del punto de saturación de fibras de especies de maderas tropicales seleccionadas utilizando diferentes métodos.» *DREWNO-MADERA*, pp. 90 - 97, 2016.
- [5] J. d. I. M. Jiménez, «Influencia de la humedad de la madera en la evaluación de las propiedades mecánicas del pino silvestre mediante técnicas no destructivas.» Madrid, 2011.
- [6] R. B. K. Patrick Perré, *Handbook of Industrial Drying*, Boca Raton: CRC Press, 2014.
- [7] Forest Products Laboratory, *Wood Handbook Wood as an Engineering Material*, Madison: United States Department of Agriculture Forest Service, 2010.
- [8] E. M. Wengert, *Principles and Practices of Drying Lumber*, Oregon: Lignomat USA Ltd., 2006.
- [9] W. T. Simpson, *Dry Kiln Operator's Manual*, Madison: United States Department of Agriculture, 1991.
- [10] AEIM, «Particularidades y anomalías de la madera aserrada.» 23 Marzo 2016. [En línea]. Available: <https://www.aeim.org/index.php/la-madera-informacion-basica/>. [Último acceso: 10 Febrero 2021].
- [11] F. M. Acosta, «Madera para construcción. Secado de la madera aserrada.» *Forestal Mesoamericana Kurú*, vol. 5, nº 13, pp. 58-63, 2012.
- [12] B. G. A. Colque, *Diseño de un horno para secado de madera de 23,1(m3) para la cuidad de el alto*, Bolivia, 2015, pp. 27 - 28.

- [13] J. Reeb y T. Brown, «Madera de secado al aire y al cobertizo,» *Hojas Divulgadoras*, pp. 15-17, 1985.
- [14] R. C. Rietz y R. H. Page, «Secado al aire de la madera.,» *Forest*, pp. 3-4, 1999.
- [15] J. Moscoso y C. Gutiérrez, *Técnicas para el secado de madera.*, Lima: ISBN , 2009, pp. 2-6.
- [16] Wood - Mizer, *Introduction to kiln drying*, 2016, p. 8.
- [17] S. Ongarato, «Tecnología de los Materiales 4°3° y 4°2°,» *tecnologiadelosmateriales1.wordpress*, 27 Junio 2010. [En línea]. Available: <https://tecnologiadelosmateriales1.wordpress.com/tag/secado-artificial/>. [Último acceso: 22 Febrero 21].
- [18] O. E. y P. A. Brian Bond, *Design and Operation of a Solar-Heated Dry Kiln for Tropical Latitudes*, Blacksburg: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, 2011, pp. 1-2.
- [19] Journal Staff, «Woodworker's Journal,» 09 Febrero 2018. [En línea]. Available: <https://www.woodworkersjournal.com/design-operate-small-scale-dehumidification-kiln/>. [Último acceso: 16 Enero 2020].
- [20] H. S. R. A. Hernán Rodríguez Sabogal, *Verificación de medida por trazabilidad a higrómetros digitales en humedad relativa*, Bogotá, 2019.
- [21] C. Martin y J. Pina, «El psicrómetro,» *Naturalmente*, vol. 1, n° 2, pp. 3-4, 13 Septiembre 2014.
- [22] Codimec SAS, «Codimec SAS,» 21 Noviembre 2016. [En línea]. Available: <https://www.codimec.com/single-post/2016/12/21/c2bfquc389-es-una-estructura-metalica#:~:text=Una%20estructura%20met%C3%A1lica%20es%20cualquier,son%20materiales%20met%C3%A1licos%2C%20normalmente%20acero..> [Último acceso: 22 Febrero 2021].
- [23] S. F. C. Jack C. McCormac, *Design of steel structures*, New Jersey: Pearson, 2017.

- [24] J. M. U. Garcia, «slideshare,» 16 Julio 2016. [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/CarlosGabrielLizarza/analisis-estructural-70584244>. [Último acceso: 24 Febrero 2021].
- [25] S. V. J. Jeffersson, “*Análisis de la Cadena de Suministros y Comercialización de Madera Balsa (Ochroma pyramidale) de la Empresa BALPLANT al Mercado Chino*”, Guayaquil, 2018.
- [26] C. Á. M. CHIRIBOGA, Tipos de corte en la madera verde de balsa (Ochroma pyramidale), y su efecto en el rendimiento industrial para la obtención de madera aserrada y otros productos., Guayaquil, 2013.
- [27] R. M. C. Cisneros, «monografias,» 15 Abril 2007. [En línea]. Available: <https://www.monografias.com/trabajos48/maderas/maderas2.shtml>. [Último acceso: 24 Febrero 2021].
- [28] F. P. Saavedra, «Secado de la Madera: Recomendaciones Prácticas.,» *Revista Cis-Madera*, pp. 47-57, 2004.
- [29] S. A. D. Hitschfeld, *Proyecto cámara de secado para madera elaborada*, Valdivia, 2009.
- [30] D. J. C. C. Ricardo David Coyago Toapanta, Diseño térmico de un horno para secado de madera con una capacidad de 23 metros cúbicos al mes., Quito, 2013.
- [31] W. O. H. Broncano, *Diseño de una cámara de secado de madera para fábrica de muebles hidalgo*, Riobamba, 2013.
- [32] Código Técnico de la Edificación de España, Seguridad estructural acciones en la edificación., España, 2009.
- [33] Instituto Ecuatoriano de Normalización, Código Ecuatoriano de la Construcción. Requisitos generales de diseño: peligro sísmico, espectros de diseño y requisitos mínimos de cálculos para diseño sísmo-resistente, Quito, 2001.
- [34] S. Viscarra, *Guía para el secado de la madera en hornos*, Santa Cruz, 1998.

- [35] M. A. B. YUNUS A. ÇENGEL, *Termodinámica*, Mexico D.F.: Mc Graw Hill, 2009.
- [36] F. Bertini, «slideshare,» 27 Octubre 2012. [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/francisco50/psicrometria-14911334>. [Último acceso: 12 Abril 2021].
- [37] Y. C. C. A.-P. G. R. Quiroz, *Diseño y simulacion del funcionamiento de un secador de flujo forzado para madera permeable con capacidad de 43m³/mes, utilizando un quemador con biomasa*, Sangolqui, 2011.
- [38] K.-H. S. Jose Ugarte Olivia, *Manual para Operadores de Secadores Convencionales para Madera.*, Lima: GIZ, 2017.
- [39] J. R. D. Nava, *Estudio experimental del efecto de la porosidad de partículas sobre el proceso de secado en un lecho fluidizado a vacío empleando aire*, Cholula, 2004, p. Universidad de las Américas Puebla.
- [40] M. E. Atencia, *Secado de Madera*, Argentina , 2004.
- [41] Lauber, «Lauber,» 15 Mayo 2001. [En línea]. Available: <https://www.lauberholzrockner.de/en/company/systems-of-technical-wood-drying>. [Último acceso: 26 Febrero 2021].
- [42] C. N.-M. Germán Moncayo, *Caracterización de las propiedades mecánicas de la madera de balsa (Ochroma Pyramidale) Ecuatoriana*, Guayaquil, 2018, pp. 1-2.
- [43] A. C. Zotelle, J. H. S. Vieira, L. A. Merlo, M. A. Lima y A. C. B. Zancanella, «EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE MADERA DE Balsa Y MATERIALES COMPUESTOS,» de ABCM, Brasil, 2019.
- [44] INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN, «CÓDIGO ECUATORIANO DE LA CONSTRUCCIÓN. REQUISITOS GENERALES DE DISEÑO.,» Quito, 2001.
- [45] Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, *Anuario Meteorológico*, Quito, 2017.

- [46] A. J. G. Yunus A. Çengel, *Trasferencia de calor y masa*, México, D.F.: McGRAW-HIL, 2011.
- [47] F. P. Incropera, *Fundamentals of heat and mass transfer*, John Wiley & Sons, 2006.
- [48] SODECA, «SODECA,» SODECA Internacional, [En línea]. Available: https://www.sodeca.com/upload/imgCatalogos/ES/CT07_Helicoidales_Tejado_2019_ES.pdf.
- [49] Optibelt, «Manual Técnico Para Transmisiones Trapeciales,» España, 2004.

CAPÍTULO VII

ANEXOS

Anexo 1

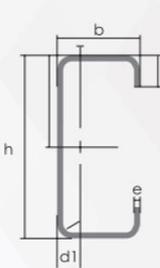
Materiales de construcción

PERFILES ESTRUCTURALES CORREAS "G"



Especificaciones Generales:

Norma:	NTE INEN 1623
Calidad:	ASTM A36 - SAE J 403 1008
Largo Normal:	6.00m y medidas especiales
Espesores:	Desde 2mm - 12mm
Acabado:	Acero negro y galvanizado



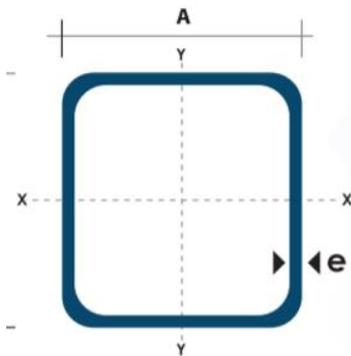
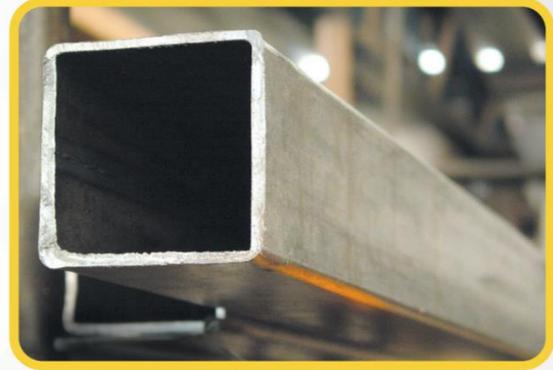
Designación	Dimensiones				Masa Kg/m	A cm ²	d1 cm	Momento de inercia		Módulo resistente		Radio de giro	
	h	b	c	e				ix	iy	Wx	Wy	ix	iy
	mm	mm	mm	mm				cm ⁴	cm ⁴	cm ³	cm ³	cm	cm
G 60x30x10x2	60	30	10	2	1,96	2,54	1,44	14,88	5,28	4,9	2,74	2,42	1,44
G 80x40x15x2	80	40	15	2	2,75	3,54	1,46	35,25	8,07	8,81	3,18	3,16	1,51
G 80x40x15x3	80	40	15	3	3,95	5,11	1,46	49,04	10,85	12,26	4,27	3,1	1,46
G 80x50x15x2	80	50	15	2	2,96	2,88	1,46	44,44	12,55	10,28	4,24	2,22	1,88
G 100x50x15x2	100	50	15	2	3,38	4,34	1,73	69,24	14,98	13,85	4,57	4,00	1,86
G 100x50x15x3	100	50	15	3	4,89	6,31	1,72	97,78	20,51	19,56	6,25	3,94	1,8
G 100x50x15x4	100	50	15	4	6,29	8,15	1,71	122,5	24,85	24,49	7,55	3,88	1,75
G 100x50x20x4	100	50	20	4	6,60	8,55	1,85	126,7	28,5	25,34	9,05	3,85	1,83
G 100x50x25x5	100	50	25	5	8,35	10,86	1,98	152,51	36,52	30,5	12,09	3,75	1,83
G 125x50x15x2	125	50	15	2	3,77	4,84	1,56	116,4	16,16	18,63	4,69	4,91	1,83
G 125x50x15x3	125	50	15	3	5,48	7,06	1,55	165,5	22,16	26,48	6,43	4,84	1,77
G 125x50x15x4	125	50	15	4	7,07	9,15	1,54	208,7	26,88	33,39	7,78	4,78	1,71
G 125x50x15x5	125	50	15	5	8,55	11,11	1,54	246,2	30,41	39,39	8,78	4,71	1,65
G 125x50x50x4	125	50	20	4	7,39	9,55	1,68	217	30,9	34,7	9,32	4,77	1,8
G 125x50x25x5	125	50	25	5	9,33	12,11	1,8	264,3	39,88	42,29	12,46	4,67	1,82
G 125x50x30x6	125	50	30	6	11,32	14,73	1,92	307,1	48,69	49,14	15,81	4,56	1,81
G 150x50x15x2	150	50	15	2	4,16	5,34	1,42	178,7	17,13	23,83	4,78	5,79	1,79
G 150x50x15x3	150	50	15	3	6,07	7,81	1,42	255,2	23,49	34,03	6,56	5,72	1,73
G 150x50x15x4	150	50	15	4	7,86	10,15	1,41	323,5	28,51	43,13	7,95	5,65	1,68
G 150x50x15x5	150	50	15	5	9,53	12,36	1,41	383,6	32,27	51,15	8,98	5,57	1,62
G 150x50x20x4	150	50	20	4	8,17	10,5	1,54	337	32,9	44,9	9,52	5,65	1,77

Medidas de correas tipo G

TUBO ESTRUCTURAL CUADRADO

Especificaciones Generales:

Norma:	NTE INEN 2415
Calidad:	SAE J 403 1008
Acabado:	Acero negro o Galvanizado
Largo Normal:	6.00m y medidas especiales
Dimensiones:	Desde 20mm a 100mm
Espesores:	Desde 1,20mm a 5,00mm



Dimensiones			Área	Ejes X-Xe Y-Y		
A mm	Espesor mm (e)	Peso Kg/m	Área cm ²	I cm ⁴	W cm ³	i cm ³
20	1.2	0.72	0.90	0.53	0.53	0.77
20	1.5	0.88	1.05	0.58	0.58	0.74
20	2.0	1.15	1.34	0.69	0.69	0.72
25	1.2	0.90	1.14	1.08	0.87	0.97
25	1.5	1.12	1.35	1.21	0.97	0.95
25	2.0	1.47	1.74	1.48	1.18	0.92
30	1.2	1.09	1.38	1.91	1.28	1.18
30	1.5	1.35	1.65	2.19	1.46	1.15
30	2.0	1.78	2.14	2.71	1.81	1.13
40	1.2	1.47	1.80	4.38	2.19	1.25
40	1.5	1.82	2.25	5.48	2.74	1.56
40	2.0	2.41	2.94	6.93	3.46	1.54
40	3.0	3.54	4.44	10.20	5.10	1.52
50	1.5	2.29	2.85	11.06	4.42	1.97
50	2.0	3.03	3.74	14.13	5.65	1.94
50	3.0	4.48	5.61	21.20	4.48	1.91
60	2.0	3.66	3.74	21.26	7.09	2.39
60	3.0	5.42	6.61	35.06	11.69	2.34
75	2.0	4.52	5.74	50.47	13.46	2.97
75	3.0	6.71	8.41	71.54	19.08	2.92
75	4.0	8.59	10.95	89.98	24.00	2.87
100	2.0	6.17	7.74	122.99	24.60	3.99
100	3.0	9.17	11.41	176.95	35.39	3.94
100	4.0	12.13	14.95	226.09	45.22	3.89
100	5.0	14.40	18.36	270.57	54.11	3.84

Medidas de tubo estructural cuadrado de acero negro

DIPANEL DP5 GALVALUME

DP5 es el techo más moderno para uso comercial-industrial fabricado por DIPAC, con maquinaria de última generación lo que lo convierte en un producto que cumple con los estándares de calidad más exigentes del mercado.



Especificaciones Generales:

Ancho útil:	1000 mm
Largo::	Estándar y a medida
Espesores:	Desde 0,25 hasta 0,9mm
Acabados	Galvalume

Beneficios:

Duración:	Cubiertas resistentes
Seguridad:	Total hermeticidad
Frescura:	Fabricado en galvalume
Resistencia a la corrosión:	Muchos años de vida útil
Economía:	Fácil mantenimiento
Fácil montaje:	Cubiertas livianas

		Distancia de Correas						
Espesores mm	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50		
	1,00	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80		
		Pesos Dipanel						
Espesores Kg/m2	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,5	1,90	2,00
	2,40	2,87	3,35	3,83	4,31	4,79	5,75	6,71

GEOMETRÍA DP5

1000



Medidas del techado galvanizado

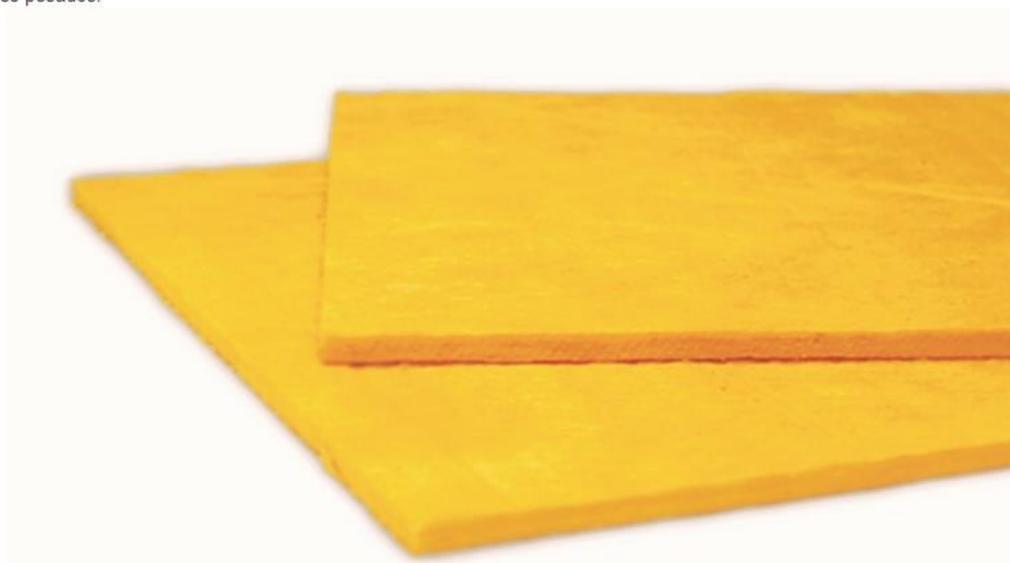
Aislanglass® Panel Libre

Descripción:

Panel rígido autosustentable sin revestimiento. Corresponde a un producto de lana de vidrio Aislanglass® cuyas dimensiones estándares son: ancho 0,60 y largo de 1,20 m, y que pueden tener variados espesores y densidades.

Los productos se entregan empaquetados con varias unidades, mediante plástico termocontraíble que le permiten un óptimo manejo durante su transporte.

Las dimensiones de los paneles pueden ser modificadas. Dependiendo de su densidad, pueden clasificarse como paneles livianos o paneles pesados.



Presentación

Tipo	Espesor (mm)	Ancho (m)	Largo (m)	R100*
Panel libre	50	0,6	1,2	131
Panel libre	60	0,6	1,2	158

* El factor R100 indica la capacidad de aislación térmica y sus unidades son ($m^2 \cdot ^\circ C/W$).

Todos los productos AislanGlass® cumplen con la norma NCh 1071.

Medidas de la lana de vidrio

TUBERÍA SIN COSTURA

CÉDULA 40



Especificaciones Generales:

ASTM A 53 GRB: Conducción fluidos y gases en minería, petroquímica, pesca y en general.

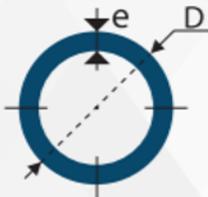
API 5L: Tubos para industria petrolera

ASTM A 106: Tubos para servicio a altas temperaturas

Recubrimiento: Negro o galvanizado

Largo normal: 6,00 mts.

Acabado: Acero negro



COMPOSICIÓN QUÍMICA %			
C Max	Mn	P Max	S Max
0.3	1.2	0.05	0.06

PROPIEDADES MECÁNICAS				
RESISTENCIA MECÁNICA		PUNTO DE FLUENCIA		Elongación % Min
Kg/mm ²	Psi	Kg/mm ²	Psi	
42.2	60000	24,6	35000	30 - 35

DIÁMETRO			PROPIEDADES				
INTERIOR	EXTERIOR (D)		ESPESOR (e)		PRESIÓN/PRUEBA		PESO
pulg	mm	pulg	mm	pulg	kg/cm ²	lb/pulg ²	kg/mts
1/2"	21.30	0.84	2.77	0.10	49	700	1.27
3/4"	26.70	1.05	2.87	0.11	49	700	1.68
1"	33.40	1.31	3.38	0.13	49	700	2.50
1 1/4"	42.20	1.66	3.56	0.14	91	1300	3.38
1 1/2"	48.30	1.90	3.68	0.14	91	1300	4.05
2"	60.30	2.37	3.91	0.15	176	2500	5.44
2 1/2"	73.00	2.87	5.16	0.20	176	2500	8.62
3"	88.90	3.50	5.49	0.21	176	2500	11.29
4"	114.30	4.50	6.02	0.23	155	2210	16.07
5"	141.30	5.56	6.55	0.25	137	1950	21.78
6"	168.30	6.62	7.11	0.28	125	1780	28.26
8"	219.10	8.62	8.18	0.32	110	1570	42.53
10"	273.00	10.75	9.27	0.36	101	1430	60.29
12"	323.80	12.75	10.31	0.40	94	1340	79.65
14"	355.60	14.00	11.13	0.43	92	1310	94.55

Medidas del tubo cédula 40

ALUMINIO

PLANCHAS LISAS



Especificaciones Generales:

DESCRIPCIÓN DE ACUERDO A NORMA	ASTM	A 1200
	TEMPLE	H 14

Aplicaciones:

- Estructuras de furgones para camiones
- Forros interiores de buses
- Recubrimiento de paredes
- Utensilios de cocina
- Recipientes para alimentos líquidos corrosivos
- Fabricación de estructuras para lámparas
- Álabes de turbinas
- Ductos
- Maquinado de piezas automotrices y de máquinas
- Bandejas para alimentos

COMPOSICIÓN QUÍMICA (%)								
Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Al
0,24	0,57	0,030	0,025	0,01	0,047	-	0,01	REMAINDER
ESPEJOR mm		RESISTENCIA MECÁNICA			% ELONGACIÓN			
0,7 - 4,00		127- 135 Kg/mm2			6,5 - 7,5			
DIMENSIONES		1220 x 2440mm (estándar)						

Medidas de las planchas lisas de aluminio

Anexo 2

Tiempos de secado

Tabla 2: Peso Específico Básico, Densidad y Programas de Secado para Maderas Bolivianas

No.	Nombre común	Nombre científico	Peb*	Dad** 12%	Horario***	
					1"	2"
1	Ajipa, Jorori	<i>Swartzia sp.</i>	0,64	---	(T2-C2)	(T2-C1)
2	Amargo	<i>Simarouba amara</i>	0,36	---	Fuerte	----
3	Amarillo	<i>Aspidosperma sp.</i>	0,61	0,73	(T6-D2)	(T3-D1)
4	Azucaró, Cedrillo	<i>Spondias mombim</i>	0,36	---	Fuerte	----
5	Balsa	<i>Ochroma pyramidale</i>	0,20	---	(T10-D4S)	(T8-D3S)
6	Borracho, Guitarrero	<i>Didymopanax morototoni</i>	0,40	---	Fuerte	----
7	Cambar	<i>Erisma uncinatum</i>	0,46	0,57	(T1-D2)	----
8	Cedro	<i>Cedrela spp.</i>	0,42	0,50	(T10-D4S)	(T8-D3S)
9	Copaibo	<i>Copaifera sp.</i>	0,60	0,70	MODERADO	----
10	Cuchi	<i>Astronium urundeuva</i>	1,00	1,22	(T1-B1)	----
11	Curupaú, Cebil	<i>Anadenanthera macrocarpa</i>	0,85	1,02	(T8-B3)	(T5-B1)
12	Cuta beniana	<i>Astronium graveolens</i>	0,86	---	(T3-C2)	----
13	Cuta blanca, Perilla	<i>Plylostylon sp.</i>	0,79	0,95	(T2-B2)	----

Tabla 233 T8-D3S

Tabla 234 T8-D4S

PASO	CONT. HUM.%	TEMPERATURA •C		HUMEDAD %		CONT. HUM.%	TEMPERATURA •C		HUMEDAD %	
		B.SECCO	B.HUM.	REL.	EQUI.		B.SECCO	B.HUM.	REL.	EQUI.
1	> 50	54,5	51,5	86	16,2	> 50	54,5	50,5	81	14,3
2	50-40	54,5	50,5	81	14,3	50-40	54,5	49,0	74	12,2
3	40-35	54,5	48,5	71	11,5	40-35	54,5	46,0	62	9,6
4	35-30	54,5	46,0	62	9,6	35-30	54,5	43,5	52	7,9
5	30-25	60,0	49,0	55	8,0	30-25	60,0	46,0	46	6,8
6	25-20	65,5	51,5	49	6,8	25-20	65,5	49,0	41	5,8
7	20-15	71,0	54,5	43	5,8	20-15	71,0	51,5	37	5,1
8	15-final	82,0	54,5	26	3,5	15-final	82,0	54,5	26	3,5
9	igualar y acondicionar según necesidad. Ver Tablas A1 y A2					igualar y acondicionar según necesidad. Ver Tablas A1 y A2				

Programa de secado para madera de balsa de 2in de espesor

Anexo 3

Factores para cálculo de carga sísmica

$C_t = 0,09$ para pórticos de acero

$C_t = 0,08$ para pórticos espaciales de hormigón armado

$C_t = 0,06$ para pórticos espaciales de hormigón armado con muros estructurales o con diagonales y para otras estructuras

Factor de tipo de material de la estructura

CIUDAD	PROVINCIA	CANTÓN	PARROQUIA	ZONA
COTACACHI	IMBABURA	COTACACHI	COTACACHI	IV
IBARRA	IMBABURA	IBARRA	IBARRA	IV
OTAVALO	IMBABURA	OTAVALO	OTAVALO	IV
PIMAMPIRO	IMBABURA	PIMAMPIRO	PIMAMPIRO	IV
URCUQUI	IMBABURA	URCUQUI	URCUQUI	IV
AMALUZA	LOJA	ESPINDOLA	AMALUZA	II
CARIAMANGA	LOJA	CALVAS	CARIAMANGA	II
CATACUCHA	LOJA	PALTAS	CATACUCHA	II
CATAMAYO	LOJA	CATAMAYO	CATAMAYO (LA TOMA)	II
GONZANAMA	LOJA	GONZANAMA	GONZANAMA	II
GUAGUARPAMBA	LOJA	CHAGUARPAMBA	CHAGUARPAMBA	II
LOJA	LOJA	LOJA	LOJA	II
QUILANGA	LOJA	QUILANGA	QUILANGA	II
SARAGURO	LOJA	SARAGURO	SAN ANTONIO DE CUMBE	II
SOZORANGA	LOJA	SOZORANGA	SOZORANGA	II
ALAMOR	LOJA	PUYANGO	ALAMOR	III
CELICA	LOJA	CELICA	CELICA	III
MACARA	LOJA	MACARA	MACARA	III
PINDAL	LOJA	PINDAL	PINDAL	III
ZAPOTILLO	LOJA	ZAPOTILLO	ZAPOTILLO	IV
BABA	LOS RÍOS	BABA	BABA	III
BABAHOYO	LOS RÍOS	BABAHOYO	PIMOCHA	III
CATARAMA	LOS RÍOS	URDANETA	CATARAMA	III
MONTALVO	LOS RÍOS	MONTALVO	MONTALVO	III
PALENQUE	LOS RÍOS	PALENQUE	PALENQUE	III
PUEBLO VIEJO	LOS RÍOS	PUEBLOVIEJO	PUEBLOVIEJO	III
QUEVEDO	LOS RÍOS	QUEVEDO	QUEVEDO	III
SAN JACINTO DE BUENA	LOS RÍOS	BUENA FE	SAN JACINTO DE BUENA FE	III

Zona sísmica	I	II	III	IV	V	VI
Valor factor Z	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥ 0.50
Caracterización del peligro sísmico	Intermedia	Alta	Alta	Alta	Alta	Muy alta

Factor de zona

Perfil tipo	Descripción	S	Cm
S1	Roca o suelo firme	1,0	2,5
S2	Suelos intermedios	1,2	3,0
S3	Suelos blandos y estrato profundo	1,5	2,8
S4	Condiciones especiales de suelo	2,0*	2,5

Factor de tipo de suelo

Categoría	Tipo de uso, destino e importancia	Coefficiente I
Edificaciones esenciales	Hospitales, clínicas, Centros de salud o de emergencia sanitaria. Instalaciones militares, de policía, bomberos, defensa civil. Garajes o estacionamientos para vehículos y aviones que atienden emergencias. Torres de control aéreo. Estructuras de centros de telecomunicaciones u otros centros de atención de emergencias. Estructuras que albergan equipos de generación y distribución eléctrica. Tanques u otras estructuras utilizadas para depósito de agua u otras sustancias anti-incendio. Estructuras que albergan depósitos tóxicos, explosivos, químicos u otras sustancias peligrosas.	1.5
Estructuras de ocupación especial	Museos, iglesias, escuelas y centros de educación o deportivos que albergan más de trescientas personas. Todas las estructuras que albergan más de cinco mil personas. Edificios públicos que requieren operar continuamente	1.3
Otras estructuras	Todas las estructuras de edificación y otras que no clasifican dentro de las categorías anteriores	1.0

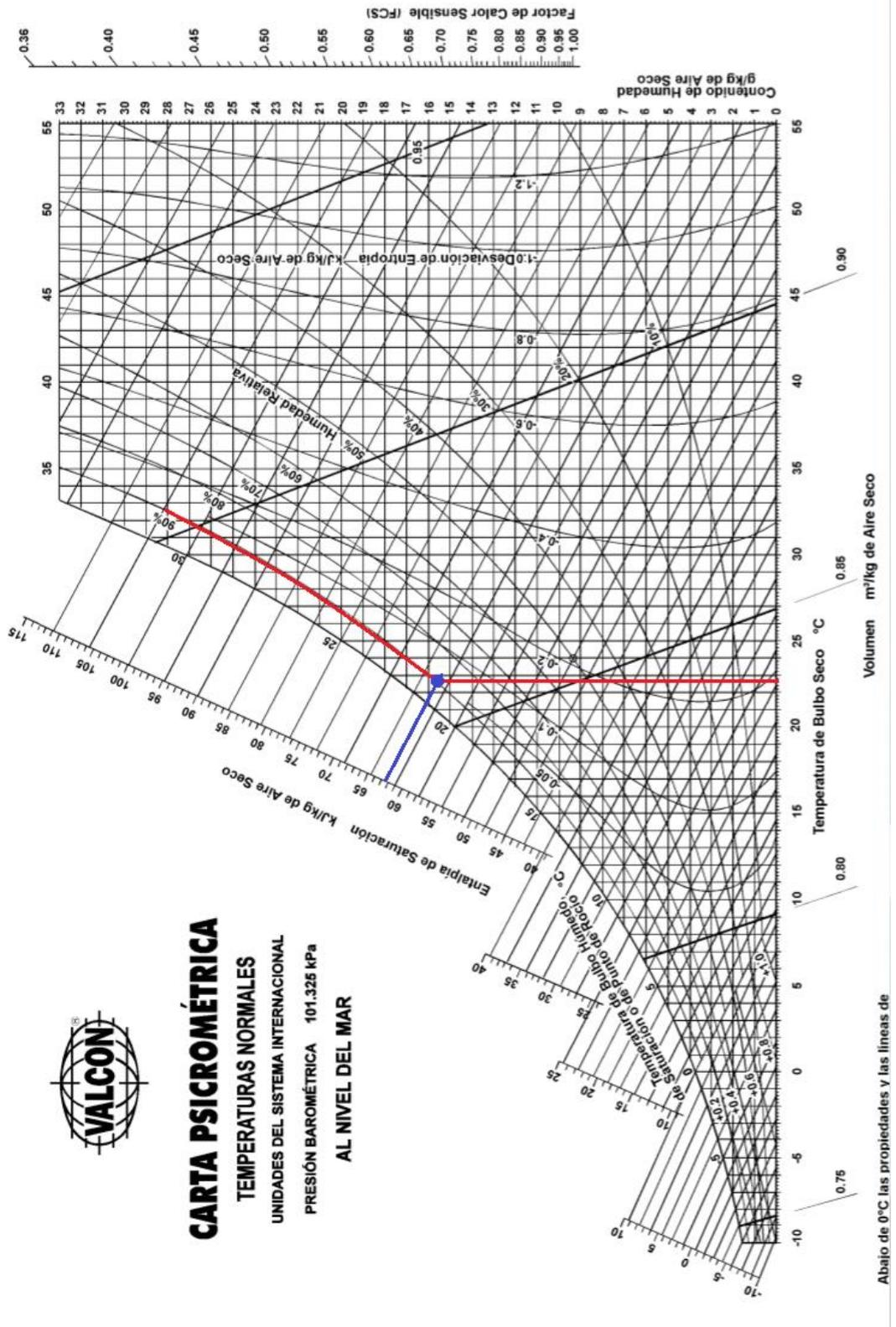
Factor de tipo de importancia y tipo de uso

TABLA 5. Coeficientes de configuración en planta.

Tipo	Descripción de las irregularidades en planta	Φ_{pi}
1	Irregularidad torsional Existe irregularidad por torsión, cuando la máxima deriva de piso de un extremo de la estructura calculada incluyendo la torsión accidental y medida perpendicularmente a un eje determinado, es mayor que 1,2 veces la deriva promedio de los extremos de la estructura con respecto al mismo eje de referencia. La torsión accidental se define en el numeral 6.4.2 del presente código.	0,9
2	Entrantes excesivos en las esquinas La configuración de una estructura se considera irregular cuando presenta entrantes excesivos en sus esquinas. Un entrante en una esquina se considera excesivo cuando las proyecciones de la estructura, a ambos lados del entrante, son mayores que el 15% de la dimensión de la planta de la estructura en la dirección del entrante.	0,9
3	Discontinuidad en el sistema de piso La configuración de la estructura se considera irregular cuando el sistema de piso tiene discontinuidades apreciables o variaciones significativas en su rigidez, incluyendo las causadas por aberturas, entrantes o huecos, con áreas mayores al 50% del área total del piso o con cambios en la rigidez en el plano del sistema de piso de más del 50% entre niveles consecutivos.	0,9
4	Desplazamiento del plano de acción de elementos verticales Una estructura se considera irregular cuando existen discontinuidades en los ejes verticales, tales como desplazamientos del plano de acción de elementos verticales del sistema resistente.	0,8
5	Ejes estructurales no paralelos La estructura se considera irregular cuando los ejes estructurales no son paralelos o simétricos con respecto a los ejes ortogonales principales de la estructura.	0,9
6	Sistema de piso flexible Cuando la relación de aspecto en planta de la edificación es mayor que 4:1 o cuando el sistema de piso no sea rígido en su propio plano se debe revisar la condición de piso flexible en el modelo estructural.	-

Anexo 4

Cartas psicrométricas



Temperatura a 22,6 °C y humedad relativa de 92%



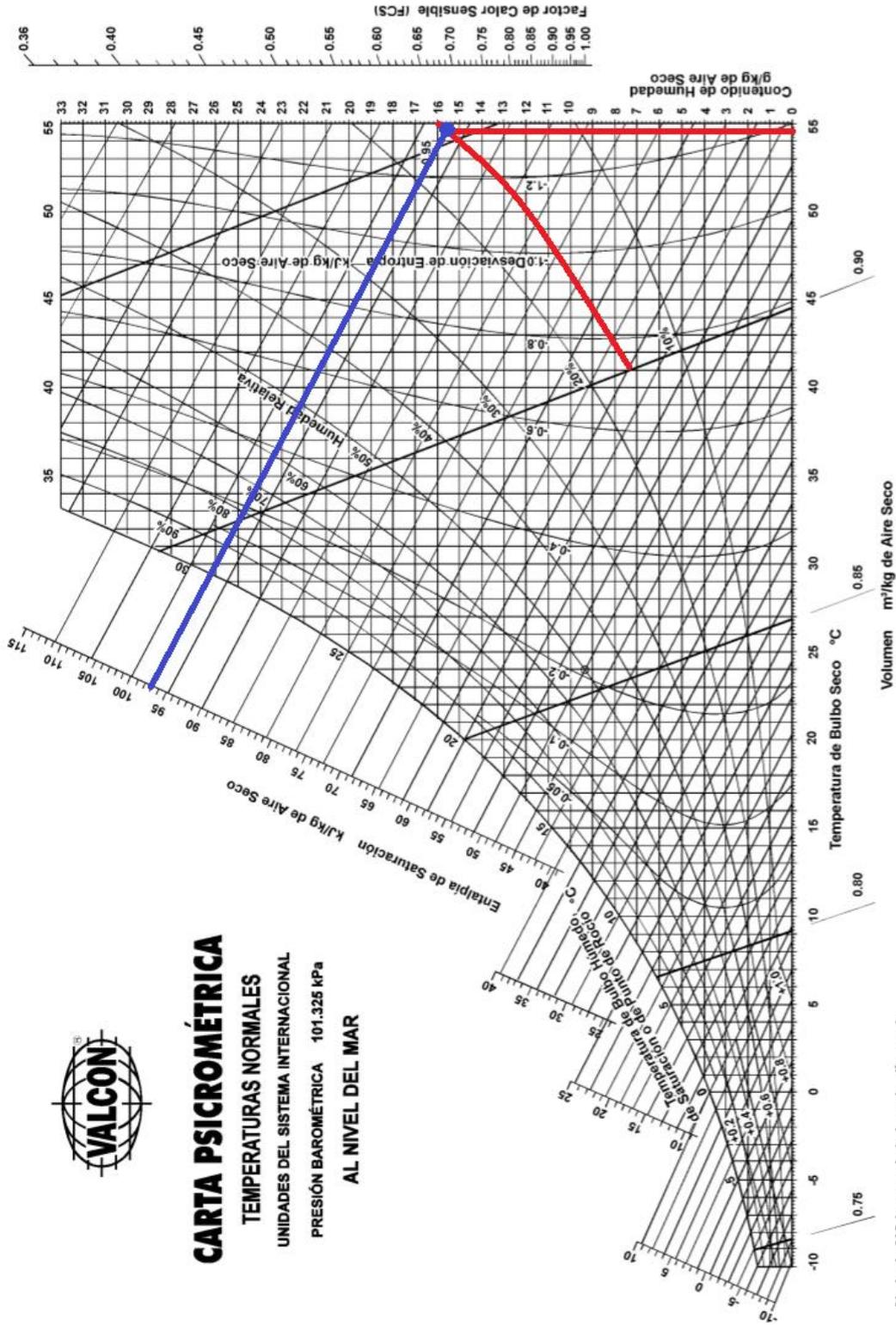
CARTA PSICROMÉTRICA

TEMPERATURAS NORMALES

UNIDADES DEL SISTEMA INTERNACIONAL

PRESIÓN BAROMÉTRICA 101.325 kPa

AL NIVEL DEL MAR



Abajo de 0°C las propiedades y las líneas de desviación de la entalpía son para el hielo

Temperatura de 54,5 °C y humedad relativa de 16%

Anexo 5

Propiedades físicas de los fluidos utilizados

TABLA A-4

Agua saturada. Tabla de temperaturas

Temp., T °C	Pres. sat., P _{sat} kPa	Volumen específico, m³/kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, kJ/kg · K		
		Liq. sat., v _f	Vapor sat., v _g	Liq. sat., u _f	Evap., u _{fg}	Vapor sat., u _g	Liq. sat., h _f	Evap., h _{fg}	Vapor sat., h _g	Liq. sat., s _f	Evap., s _{fg}	Vapor sat., s _g
0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.000	2374.9	2374.9	0.001	2500.9	2500.9	0.0000	9.1556	9.1556
5	0.8725	0.001000	147.03	21.019	2360.8	2381.8	21.020	2489.1	2510.1	0.0763	8.9487	9.0249
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.6	2388.7	42.022	2477.2	2519.2	0.1511	8.7488	8.8999
15	1.7057	0.001001	77.885	62.980	2332.5	2395.5	62.982	2465.4	2528.3	0.2245	8.5559	8.7803
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3	83.915	2453.5	2537.4	0.2965	8.3696	8.6661
25	3.1698	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2546.5	0.3672	8.1895	8.5567
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2555.6	0.4368	8.0152	8.4520
35	5.6291	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2564.6	0.5051	7.8466	8.3517
40	7.3851	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2573.5	0.5724	7.6832	8.2556
45	9.5953	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1	188.44	2394.0	2582.4	0.6386	7.5247	8.1633
50	12.352	0.001012	12.026	209.33	2233.4	2442.7	209.34	2382.0	2591.3	0.7038	7.3710	8.0748
55	15.763	0.001015	9.5639	230.24	2219.1	2449.3	230.26	2369.8	2600.1	0.7680	7.2218	7.9898
60	19.947	0.001017	7.6670	251.16	2204.7	2455.9	251.18	2357.7	2608.8	0.8313	7.0769	7.9082
65	25.043	0.001020	6.1935	272.09	2190.3	2462.4	272.12	2345.4	2617.5	0.8937	6.9360	7.8296
70	31.202	0.001023	5.0396	293.04	2175.8	2468.9	293.07	2333.0	2626.1	0.9551	6.7989	7.7540
75	38.597	0.001026	4.1291	313.99	2161.3	2475.3	314.03	2320.6	2634.6	1.0158	6.6655	7.6812
80	47.416	0.001029	3.4053	334.97	2146.6	2481.6	335.02	2308.0	2643.0	1.0756	6.5355	7.6111
85	57.868	0.001032	2.8261	355.96	2131.9	2487.8	356.02	2295.3	2651.4	1.1346	6.4089	7.5435
90	70.183	0.001036	2.3593	376.97	2117.0	2494.0	377.04	2282.5	2659.6	1.1929	6.2853	7.4782
95	84.609	0.001040	1.9808	398.00	2102.0	2500.1	398.09	2269.6	2667.6	1.2504	6.1647	7.4151
100	101.42	0.001043	1.6720	419.06	2087.0	2506.0	419.17	2256.4	2675.6	1.3072	6.0470	7.3542
105	120.90	0.001047	1.4186	440.15	2071.8	2511.9	440.28	2243.1	2683.4	1.3634	5.9319	7.2952
110	143.38	0.001052	1.2094	461.27	2056.4	2517.7	461.42	2229.7	2691.1	1.4188	5.8193	7.2382
115	169.18	0.001056	1.0360	482.42	2040.9	2523.3	482.59	2216.0	2698.6	1.4737	5.7092	7.1829
120	198.67	0.001060	0.89133	503.60	2025.3	2528.9	503.81	2202.1	2706.0	1.5279	5.6013	7.1292
125	232.23	0.001065	0.77012	524.83	2009.5	2534.3	525.07	2188.1	2713.1	1.5816	5.4956	7.0771
130	270.28	0.001070	0.66808	546.10	1993.4	2539.5	546.38	2173.7	2720.1	1.6346	5.3919	7.0265
135	313.22	0.001075	0.58179	567.41	1977.3	2544.7	567.75	2159.1	2726.9	1.6872	5.2901	6.9773
140	361.53	0.001080	0.50850	588.77	1960.9	2549.6	589.16	2144.3	2733.5	1.7392	5.1901	6.9294
145	415.68	0.001085	0.44600	610.19	1944.2	2554.4	610.64	2129.2	2739.8	1.7908	5.0919	6.8827
150	476.16	0.001091	0.39248	631.66	1927.4	2559.1	632.18	2113.8	2745.9	1.8418	4.9953	6.8371
155	543.49	0.001096	0.34648	653.19	1910.3	2563.5	653.79	2098.0	2751.8	1.8924	4.9002	6.7927
160	618.23	0.001102	0.30680	674.79	1893.0	2567.8	675.47	2082.0	2757.5	1.9426	4.8066	6.7492
165	700.93	0.001108	0.27244	696.46	1875.4	2571.9	697.24	2065.6	2762.8	1.9923	4.7143	6.7067
170	792.18	0.001114	0.24260	718.20	1857.5	2575.7	719.08	2048.8	2767.9	2.0417	4.6233	6.6650
175	892.60	0.001121	0.21659	740.02	1839.4	2579.4	741.02	2031.7	2772.7	2.0906	4.5335	6.6242
180	1002.8	0.001127	0.19384	761.92	1820.9	2582.8	763.05	2014.2	2777.2	2.1392	4.4448	6.5841
185	1123.5	0.001134	0.17390	783.91	1802.1	2586.0	785.19	1996.2	2781.4	2.1875	4.3572	6.5447
190	1255.2	0.001141	0.15636	806.00	1783.0	2589.0	807.43	1977.9	2785.3	2.2355	4.2705	6.5059
195	1398.8	0.001149	0.14089	828.18	1763.6	2591.7	829.78	1959.0	2788.8	2.2831	4.1847	6.4678
200	1554.9	0.001157	0.12721	850.46	1743.7	2594.2	852.26	1939.8	2792.0	2.3305	4.0997	6.4302

Propiedades termodinámicas del agua saturada

TABLA A-15

Propiedades del aire a la presión de 1 atm

Temp., T, °C	Densidad, ρ , kg/m ³	Calor específico, c_p , J/kg · K	Conductividad térmica, k, W/m · K	Difusividad térmica, α , m ² /s ²	Viscosidad dinámica, μ , kg/m · s	Viscosidad cinemática, ν , m ² /s	Número de Prandtl, Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-6}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1 002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1 004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1 005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1 006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1 006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1 006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1 006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1 007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1 007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1 007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1 007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1 007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1 007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1 007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1 007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1 007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1 007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1 008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1 008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1 009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1 011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1 013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041
160	0.8148	1 016	0.03511	4.241×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.975×10^{-5}	0.7014
180	0.7788	1 019	0.03646	4.593×10^{-5}	2.504×10^{-5}	3.212×10^{-5}	0.6992
200	0.7459	1 023	0.03779	4.954×10^{-5}	2.577×10^{-5}	3.455×10^{-5}	0.6974
250	0.6746	1 033	0.04104	5.890×10^{-5}	2.760×10^{-5}	4.091×10^{-5}	0.6946
300	0.6158	1 044	0.04418	6.871×10^{-5}	2.934×10^{-5}	4.765×10^{-5}	0.6935
350	0.5664	1 056	0.04721	7.892×10^{-5}	3.101×10^{-5}	5.475×10^{-5}	0.6937
400	0.5243	1 069	0.05015	8.951×10^{-5}	3.261×10^{-5}	6.219×10^{-5}	0.6948
450	0.4880	1 081	0.05298	1.004×10^{-4}	3.415×10^{-5}	6.997×10^{-5}	0.6965
500	0.4565	1 093	0.05572	1.117×10^{-4}	3.563×10^{-5}	7.806×10^{-5}	0.6986
600	0.4042	1 115	0.06093	1.352×10^{-4}	3.846×10^{-5}	9.515×10^{-5}	0.7037
700	0.3627	1 135	0.06581	1.598×10^{-4}	4.111×10^{-5}	1.133×10^{-4}	0.7092
800	0.3289	1 153	0.07037	1.855×10^{-4}	4.362×10^{-5}	1.326×10^{-4}	0.7149
900	0.3008	1 169	0.07465	2.122×10^{-4}	4.600×10^{-5}	1.529×10^{-4}	0.7206
1 000	0.2772	1 184	0.07868	2.398×10^{-4}	4.826×10^{-5}	1.741×10^{-4}	0.7260
1 500	0.1990	1 234	0.09599	3.908×10^{-4}	5.817×10^{-5}	2.922×10^{-4}	0.7478
2 000	0.1553	1 264	0.11113	5.664×10^{-4}	6.630×10^{-5}	4.270×10^{-4}	0.7539

Propiedades termo físicas del aire a 1atm de presión

TABLA A-9

Propiedades del agua saturada

Temp., T °C	Presión de saturación, P _{sat} kPa	Densidad, ρ kg/m ³		Entalpía de vaporización, h _g kJ/kg	Calor específico, c _p J/kg · K		Conductividad térmica, k W/m · K		Viscosidad dinámica, μ kg/m · s		Número de Prandtl, Pr		Coeficiente de expansión volumétrica, β 1/K
		Líquido	Vapor		Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	
0.01	0.6113	999.8	0.0048	2 501	4 217	1 854	0.561	0.0171	1.792 × 10 ⁻³	0.922 × 10 ⁻⁵	13.5	1.00	-0.068 × 10 ⁻³
5	0.8721	999.9	0.0068	2 490	4 205	1 857	0.571	0.0173	1.519 × 10 ⁻³	0.934 × 10 ⁻⁵	11.2	1.00	0.015 × 10 ⁻³
10	1.2276	999.7	0.0094	2 478	4 194	1 862	0.580	0.0176	1.307 × 10 ⁻³	0.946 × 10 ⁻⁵	9.45	1.00	0.733 × 10 ⁻³
15	1.7051	999.1	0.0128	2 466	4 185	1 863	0.589	0.0179	1.138 × 10 ⁻³	0.959 × 10 ⁻⁵	8.09	1.00	0.138 × 10 ⁻³
20	2.339	998.0	0.0173	2 454	4 182	1 867	0.598	0.0182	1.002 × 10 ⁻³	0.973 × 10 ⁻⁵	7.01	1.00	0.195 × 10 ⁻³
25	3.169	997.0	0.0231	2 442	4 180	1 870	0.607	0.0186	0.891 × 10 ⁻³	0.987 × 10 ⁻⁵	6.14	1.00	0.247 × 10 ⁻³
30	4.246	996.0	0.0304	2 431	4 178	1 875	0.615	0.0189	0.798 × 10 ⁻³	1.001 × 10 ⁻⁵	5.42	1.00	0.294 × 10 ⁻³
35	5.628	994.0	0.0397	2 419	4 178	1 880	0.623	0.0192	0.720 × 10 ⁻³	1.016 × 10 ⁻⁵	4.83	1.00	0.337 × 10 ⁻³
40	7.384	992.1	0.0512	2 407	4 179	1 885	0.631	0.0196	0.653 × 10 ⁻³	1.031 × 10 ⁻⁵	4.32	1.00	0.377 × 10 ⁻³
45	9.593	990.1	0.0655	2 395	4 180	1 892	0.637	0.0200	0.596 × 10 ⁻³	1.046 × 10 ⁻⁵	3.91	1.00	0.415 × 10 ⁻³
50	12.35	988.1	0.0831	2 383	4 181	1 900	0.644	0.0204	0.547 × 10 ⁻³	1.062 × 10 ⁻⁵	3.55	1.00	0.451 × 10 ⁻³
55	15.76	985.2	0.1045	2 371	4 183	1 908	0.649	0.0208	0.504 × 10 ⁻³	1.077 × 10 ⁻⁵	3.25	1.00	0.484 × 10 ⁻³
60	19.94	983.3	0.1304	2 359	4 185	1 916	0.654	0.0212	0.467 × 10 ⁻³	1.093 × 10 ⁻⁵	2.99	1.00	0.517 × 10 ⁻³
65	25.03	980.4	0.1614	2 346	4 187	1 926	0.659	0.0216	0.433 × 10 ⁻³	1.110 × 10 ⁻⁵	2.75	1.00	0.548 × 10 ⁻³
70	31.19	977.5	0.1983	2 334	4 190	1 936	0.663	0.0221	0.404 × 10 ⁻³	1.126 × 10 ⁻⁵	2.55	1.00	0.578 × 10 ⁻³
75	38.58	974.7	0.2421	2 321	4 193	1 948	0.667	0.0225	0.378 × 10 ⁻³	1.142 × 10 ⁻⁵	2.38	1.00	0.607 × 10 ⁻³
80	47.39	971.8	0.2935	2 309	4 197	1 962	0.670	0.0230	0.355 × 10 ⁻³	1.159 × 10 ⁻⁵	2.22	1.00	0.653 × 10 ⁻³
85	57.83	968.1	0.3536	2 296	4 201	1 977	0.673	0.0235	0.333 × 10 ⁻³	1.176 × 10 ⁻⁵	2.08	1.00	0.670 × 10 ⁻³
90	70.14	965.3	0.4235	2 283	4 206	1 993	0.675	0.0240	0.315 × 10 ⁻³	1.193 × 10 ⁻⁵	1.96	1.00	0.702 × 10 ⁻³
95	84.55	961.5	0.5045	2 270	4 212	2 010	0.677	0.0246	0.297 × 10 ⁻³	1.210 × 10 ⁻⁵	1.85	1.00	0.716 × 10 ⁻³
100	101.33	957.9	0.5978	2 257	4 217	2 029	0.679	0.0251	0.282 × 10 ⁻³	1.227 × 10 ⁻⁵	1.75	1.00	0.750 × 10 ⁻³
110	143.27	950.6	0.8263	2 230	4 229	2 071	0.682	0.0262	0.255 × 10 ⁻³	1.261 × 10 ⁻⁵	1.58	1.00	0.798 × 10 ⁻³
120	198.53	943.4	1.121	2 203	4 244	2 120	0.683	0.0275	0.232 × 10 ⁻³	1.296 × 10 ⁻⁵	1.44	1.00	0.858 × 10 ⁻³
130	270.1	934.6	1.496	2 174	4 263	2 177	0.684	0.0288	0.213 × 10 ⁻³	1.330 × 10 ⁻⁵	1.33	1.01	0.913 × 10 ⁻³
140	361.3	921.7	1.965	2 145	4 286	2 244	0.683	0.0301	0.197 × 10 ⁻³	1.365 × 10 ⁻⁵	1.24	1.02	0.970 × 10 ⁻³
150	475.8	916.6	2.546	2 114	4 311	2 314	0.682	0.0316	0.183 × 10 ⁻³	1.399 × 10 ⁻⁵	1.16	1.02	1.025 × 10 ⁻³
160	617.8	907.4	3.256	2 083	4 340	2 420	0.680	0.0331	0.170 × 10 ⁻³	1.434 × 10 ⁻⁵	1.09	1.05	1.145 × 10 ⁻³
170	791.7	897.7	4.119	2 050	4 370	2 490	0.677	0.0347	0.160 × 10 ⁻³	1.468 × 10 ⁻⁵	1.03	1.05	1.178 × 10 ⁻³
180	1 002.1	887.3	5.153	2 015	4 410	2 590	0.673	0.0364	0.150 × 10 ⁻³	1.502 × 10 ⁻⁵	0.983	1.07	1.210 × 10 ⁻³
190	1 254.4	876.4	6.388	1 979	4 460	2 710	0.669	0.0382	0.142 × 10 ⁻³	1.537 × 10 ⁻⁵	0.947	1.09	1.280 × 10 ⁻³
200	1 553.8	864.3	7.852	1 941	4 500	2 840	0.663	0.0401	0.134 × 10 ⁻³	1.571 × 10 ⁻⁵	0.910	1.11	1.350 × 10 ⁻³
220	2 318	840.3	11.60	1 859	4 610	3 110	0.650	0.0442	0.122 × 10 ⁻³	1.641 × 10 ⁻⁵	0.865	1.15	1.520 × 10 ⁻³
240	3 344	813.7	16.73	1 767	4 760	3 520	0.632	0.0487	0.111 × 10 ⁻³	1.712 × 10 ⁻⁵	0.836	1.24	1.720 × 10 ⁻³
260	4 688	783.7	23.69	1 663	4 970	4 070	0.609	0.0540	0.102 × 10 ⁻³	1.788 × 10 ⁻⁵	0.832	1.35	2.000 × 10 ⁻³
280	6 412	750.8	33.15	1 544	5 280	4 835	0.581	0.0605	0.094 × 10 ⁻³	1.870 × 10 ⁻⁵	0.854	1.49	2.380 × 10 ⁻³
300	8 581	713.8	46.15	1 405	5 750	5 980	0.548	0.0695	0.086 × 10 ⁻³	1.965 × 10 ⁻⁵	0.902	1.69	2.950 × 10 ⁻³
320	11 274	667.1	64.57	1 239	6 540	7 900	0.509	0.0836	0.078 × 10 ⁻³	2.084 × 10 ⁻⁵	1.00	1.97	—
340	14 586	610.5	92.62	1 028	8 240	11 870	0.469	0.110	0.070 × 10 ⁻³	2.255 × 10 ⁻⁵	1.23	2.43	—
360	18 651	528.3	144.0	720	14 690	25 800	0.427	0.178	0.060 × 10 ⁻³	2.571 × 10 ⁻⁵	2.06	3.73	—
374.14	22 090	317.0	317.0	0	—	—	—	—	0.043 × 10 ⁻³	4.313 × 10 ⁻⁵	—	—	—

Propiedades termo físicas del agua saturada

Anexo 6

Características de la caldera



Calderas, Quemadores, Intercambiadores, Autoclaves, Marmitas,
Equipos para Baños Turcos, Tanques,
Ingeniería, Repuestos, Montajes, Mantenimiento



NIT. 860.053.840-8

CODIGO : CODIGO : AC556/66/76

CALDERA para producción de vapor, capacidad **50 B.H.P.** Combustible **DUAL** (Acpm / gas), marca **TECNİK**. Adicional tanque de condensados con motobomba para inyección de agua.

ESPECIFICACIONES TECNICAS

CAPACIDAD	:	50 B.H.P. – 1.673.000 BTU / HORA.
COMBUSTIBLE	:	DUAL (ACPM y/o GAS NT.)
PRESION DE TRABAJO	:	0 a 125 psi.
PRESION DE DISEÑO	:	150 psi.
CONSUMO A.C.P.M.	:	15 galones / hora.
CONSUMO GAS NATURAL	:	54 m3/hora de Hi: 38.500 BTU/MT3
CONSUMO DE GAS PROPANO	:	96 Lb/Hora de Hi: 21.500 BTU/ LB.
PRODUCCION DE VAPOR	:	1.725 libras / hora a 212° F.
QUEMADOR DE COMBUSTION:	:	Tiro forzado según Norma UL & FM.
PESO NETO	:	2.750 Kilos.
PESO CON AGUA A NIVEL	:	4.350 Kilos.
TIPO	:	Pirotubular, Horizontal 2 pasos.
SUPERFICIE DE TRANSF	:	260 Ft2
DIMENSIONES CUERPO	:	135 cms diámetro x 270 cms longitud.
DIMENSIONES BASE	:	220 cms long. x 120 cms ancho
DIMENSION GENERAL	:	350 cms long. x 175 cms ancho x 200 cms altura
SISTEMA ELECTRICO	:	110 - 220 – 440 Voltios.
MANEJO.	:	Automático.
CONTROLES DE SEGURIDAD	:	Protección alto-bajo nivel de agua Protección control máx. presión vapor Protección control seguridad llama.
EQUIPO ADICIONAL	:	* Tanque de Condensados cap. 60 gls. * Motobomba de alimentación de agua 10 gpm.
NORMAS DE FABRICACION	:	Según Icontec y Asme.
MATERIALES DE FABRICAC	:	Láminas para cuerpo y haz de tuberías interna de fuego en Acero al Carbono ASTM. Aislamiento y lámina inox. acabado exterior.
GARANTIAS OFRECIDAS	:	Certificados de calidad de los controles y de las materias primas del equipo. Garantía contra defectos de fabricación de 12 meses para el cuerpo y el haz tubular. Garantizamos el equipo para vida útil de 20 años mínimo en condiciones normales de operación.

Anexo 7

Programa de secado utilizado en la industria de secado de madera de balsa con espesor de 2 ¼ in.

APRESA	LOTE No.	IDENT. SECADORA	CANT. DE LINEAS	GRUESOS DE MAD. EN EL LOTE	SCHEDULE UTILIZADA	VOLUMEN DE LA CARGA BFT	FECHA DE INICIO	FECHA DE SALIDA			
	721	15	2	2 ¼	Bt-12		13-11-20	18-11-20			
IDENT. DE MUEST.	PESO HUM PMS	HUMEDAD ATRIBUID A LA MUESTRA %H	PESO SECO DE LA MUESTRA $PS = PMS / (1 + \%H / 100)$	HUMEDAD DE SALIDA DE LAS MUESTRAS $\%H = (PMS - PS) / PS \times 100$	PESOS DE SALIDAS DE LAS MUESTRAS PMS		OBSERVACIONES				
M1	275	136	116								
M2	263	130	114								
M3	270	134	115								
M4	284	130	123								
M5											
M6											
PROGRAMA DE SECADO					CAMBIOS DE HUMEDADES DE LAS MUESTRAS EN %						
DIA	FECHA	HORA	HUM. PROM. MUESTRAS Prom Humedad diaria	TEMPERATURAS PROGRAMADAS GRAD. F		M1	M2	M3	M4	M5	M6
				BULB. SECO	BULB. HUMED						
0	13/11/20	23:00	133%	135	125	275 136	263 130	270 134	284 130		
1	14/11/20	23:00	70%	145	116	200 72	192 68	198 72	208 69		
2	15/11/20	23:00	34%	156	108	155 34	152 33	154 34	164 33		
3	16/11/20	08:00	16%	167	100	135 16	134 17	134 16	143 16		
4	17/11/20	08:00	8%	167	100	125 8	123 8	123 7	133 8		
5											
6											
7											
8											
9											
10											
11											
12											
13											
14											
15											
16											
17											