



UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

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

Título del Proyecto de Investigación:

“Diseño de una cámara de secado para madera balsa mediante el empleo de un sistema híbrido, para reducir la energía suministrada por la caldera a los hornos convencionales de secado”.

Autor:

Jair Ronaldo Pincay de la Rosa.

Director de Proyecto de Investigación:

Ing. Diego Javier Punina Guerrero.

Quevedo – Los Ríos – Ecuador

2021

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo, **Jair Ronaldo Pincay de la Rosa**, declaro 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.

Jair Ronaldo Pincay de la Rosa
C.C. # 0940264864
AUTOR



CERTIFICACIÓN DE CULMINACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

El suscrito, **ING. DIEGO JAVIER PUNINA GUERRERO MSC.** docente de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, certifica que el estudiante **JAIR RONALDO PINCAY DE LA ROSA**, realizó el Proyecto de Investigación de grado titulado “**Diseño de una cámara de secado para madera balsa mediante el empleo de un sistema híbrido, para reducir la energía suministrada por la caldera a los hornos convencionales 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. Diego Javier Punina Guerrero, Msc.
DIRECTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN



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

Por medio del presente me permito certificar, que el Sr. **JAIR RONALDO PINCAY DE LA ROSA**, egresado de la carrera de Ingeniería Mecánica, una vez revisada la tesis de grado titulada “**Diseño de una cámara de secado para madera balsa mediante el empleo de un sistema híbrido, para reducir la energía suministrada por la caldera a los hornos convencionales de secado**”, tengo a bien informar que se realizó la revisión respectiva por medio del sistema Urkund, con un porcentaje favorable del 2%, cumpliendo con el reglamento de Graduación de Estudiantes de Pregrado y la Normativa establecida por la Universidad.

Se adjunta el resultado del sistema URKUND

URKUND	
Documento	Urkund Tesis de Investigación Diseño de una Cámara de Secado de Madera Balsa.docx (D99868866)
Presentado	2021-03-26 17:14 (-05:00)
Presentado por	jair.pincay2015@uteq.edu.ec
Recibido	dpuninag2.uteq@analysis.orkund.com
Mensaje	[Diseño de una cámara de secado híbrida para madera de balsa] Mostrar el mensaje completo 2% de estas 33 páginas, se componen de texto presente en 6 fuentes.

Ing. Diego Javier Punina Guerrero, Msc.
DIRECTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN



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

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Título:

“Diseño de una cámara de secado para madera balsa mediante el empleo de un sistema híbrido, para reducir la energía suministrada por la caldera a los hornos convencionales de secado”

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

Aprobado por:

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL
Ing. Yusimit Karina Zamora Hernández

MIEMBRO DEL TRIBUNAL
Ing. Milton Iván Villafuerte López

MIEMBRO DEL TRIBUNAL
Ing. José David Barros Enríquez

Quevedo – Los Ríos – Ecuador

2021

AGRADECIMIENTO

Primeramente, agradezco a Dios por darme salud, bienestar y permitirme haber llegado hasta estas instancias de mis estudios profesionales.

Además, agradezco a mis padres quienes me dieron la vida, por educarme, por guiarme en el camino correcto, por apoyarme para culminar mis estudios, por enseñarme buenos valores para llegar a ser una persona correcta y lograr ser un profesional exitoso.

Por último, agradecerles a los docentes de mi prestigiosa universidad, quienes con su guía, enseñanza y educación lograron formar grandiosos profesionales, compartiendo sus conocimientos y experiencias para orientarnos en el campo laboral y de esta manera llegar a ser excelentes profesionales.

Jair Ronaldo Pincay de la Rosa

DEDICATORIA

Quiero dedicarle esta tesis de investigación principalmente a Dios por ser mi guía espiritual, y a mis padres, quienes siempre confiaron y creyeron en mí sin importar los tropiezos sufridos durante mis estudios de pregrado.

A mis hermanos, por el apoyo y motivación constante que me brindaban, para que siempre me mantenga firme en mis estudios.

Jair Ronaldo Pincay de la Rosa

RESUMEN Y PALABRAS CLAVES

En la presente investigación se diseñó una cámara de secado híbrida que contribuya al aprovechamiento de la energía solar para el secado de la madera de balsa. En esta investigación, se aplicó la metodología del proceso de diseño de la ingeniería concurrente basado en las etapas de especificación, diseño conceptual, diseño de materialización y diseño de detalle. El diseño de la cámara de secado seleccionado en la etapa de conceptualización contiene los siguientes componentes: colector solar, ventiladores ubicados en la parte del colector, caldera de biomasa, serpentines y ventoleras. Las dimensiones del diseño propuesto son de 3.2 metros de longitud, 4.8 metros de ancho y 2.1 metros de altura, se compone de una cubierta de vidrio y debajo de ella se encuentra ubicada la placa absorbadora (pintada de color negro mate) con una inclinación de 10 grados. La eficiencia del colector solar plano es de 32.35 % y su energía útil es de 1.47 *kilovatios* al día, equivalente a 44 *kilovatios* al mes y 530 *kilovatios* de energía por año, aproximadamente. Por último, mediante simulación fluidodinámica se verificó que el diseño propuesto con deflectores en las esquinas de la cámara presenta una adecuada distribución de velocidades cuando el aire caliente fluye por la pila de madera.

Palabras clave: Cámara de secado, colector solar, flujo de aire, balsa.

ABSTRACT AND KEYWORDS

In this project, a hybrid drying chamber that contributes to the use of solar energy for the drying of balsa wood was designed. In this research, the methodology of the concurrent engineering design process was applied based on the stages of specification, conceptual design, materialization design and detail design. The design of the drying chamber selected in the conceptualization stage contains the following components: solar collector, fans located in the collector part, biomass boiler, coils and ventoleras. The dimensions of the proposed design are 3.2 meters long, 4.8 meters wide and 2.1 meters high, consists of a glass cover and below it is located the absorbent plate (painted matte black) with an inclination of 10 degrees. The efficiency of the flat solar 32.35 % collector is of and its useful energy is up to 1.47 kilovatios date, equivalent to the month 44 kilovatios and 530 kilovatios energy per year, approximately. Finally, fluid dynamic simulation verified that the proposed design with deflectors in the corners of the chamber has an adequate speed distribution when hot air flows through the wood pile.

Keywords: drying chamber, solar collector, air flows, balsa.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN Y PALABRAS CLAVES.....	viii
ABSTRACT AND KEYWORDS	ix
TABLA DE CONTENIDO	x
ÍNDICE DE GRÁFICOS	xv
ÍNDICE DE TABLAS.....	xvii
ÍNDICE DE ECUACIONES	xvii
ÍNDICE DE ANEXOS	xviii
CÓDIGO DUBLIN	xix
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I.....	2
CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	2
1.1. Problema de investigación.	3
1.1.1. Planteamiento del problema.....	3
1.1.2. Formulación del problema.	4
1.1.3. Sistematización del problema.....	4
1.2. Objetivos.....	5
1.2.1. Objetivo general.....	5
1.2.2. Objetivos específicos.....	5
1.3. Justificación.	5
CAPÍTULO II.....	7
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN	7
2.1. Marco conceptual.....	8
2.1.1. Madera de balsa.....	8
2.1.2. Madera aserrada.	9
2.1.3. Pie tablar.....	9

2.1.4.	Cubicación de la madera (factor de apilado).....	9
2.1.5.	Humedad de la madera.	10
2.1.6.	Secado de la madera.	11
2.1.6.1.	Proceso de secado de madera.....	11
2.1.7.	Cámara de secado convencional para madera (hornos convencionales).....	11
2.1.8.	Caldera de vapor.....	12
2.1.9.	Cámara de secado solar para madera	12
2.1.10.	Cámara de secado híbrida para madera	13
2.1.11.	Energía solar	13
2.1.12.	Biomasa	14
2.1.12.1.	Combustión de biomasa.	14
2.1.12.2.	Emisiones	15
2.1.13.	Transferencia de calor y masa.	15
2.1.13.1.	Transferencia de calor.	15
2.1.13.2.	Transferencia de masa.....	16
2.1.13.3.	Transferencia de calor en la ingeniería.	16
2.1.14.	Método de volúmenes finitos (FVM)	16
2.1.15.	Software Ansys Discovery Live.....	17
2.1.15.1.	Análisis fluidodinámico	17
2.1.15.2.	Análisis térmico.....	17
2.1.15.3.	Fortalezas clave del Ansys Discovery Live	18
2.1.16.	Software Ansys AIM	18
2.1.16.1.	Personalización de los flujos de trabajo de simulación.....	19
2.1.16.2.	Simulación multifísica en AIM.	19
2.2.	Marco referencial.....	20
2.2.1.	La ingeniería concurrente.....	22
2.2.2.	Diseño conceptual.	23

2.2.3.	Diseño de materialización.....	24
2.2.3.1.	Pasos del diseño de materialización.....	24
2.2.4.	Estructura funcional del diseño.....	25
2.2.5.	Matriz QFD.....	25
2.2.5.1.	Flujo de la metodología QFD.....	26
CAPÍTULO III		27
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN		27
3.1.	Localización.....	28
3.2.	Tipo de investigación.....	29
3.2.1.	Investigación experimental.....	29
3.2.2.	Investigación de campo.....	29
3.2.3.	Investigación bibliográfica.....	29
3.3.	Métodos de investigación.....	30
3.3.1.	Método descriptivo.....	30
3.3.2.	Método experimental.....	30
3.3.3.	Método deductivo.....	30
3.4.	Fuentes de recopilación de información.....	30
3.5.	Diseño de la investigación.....	31
3.6.	Tratamiento de los datos.....	31
3.7.	Recursos humanos y materiales.....	31
3.7.1.	Insumos, equipos y otros.....	31
CAPÍTULO IV		32
RESULTADOS Y DISCUSIÓN		32
4.1.	Proceso de diseño de la cámara híbrida de secado para madera de balsa.....	33
4.2.	Definición del diseño (criterios de diseño).....	34
4.2.1.	Especificaciones de diseño (especificaciones del usuario).....	35

4.2.2.	Requerimientos técnicos de ingeniería (características técnicas de ingeniería).	36
4.2.3.	Elaboración de la matriz QFD.....	37
4.3.	Diseño conceptual.....	41
4.3.1.	Función principal y estructura funcional para el diseño de la cámara de secado para madera de balsa.....	44
4.3.2.	Principios de solución de diseño.....	48
4.3.2.1.	Solución A.....	48
4.3.2.2.	Solución B.....	48
4.3.2.3.	Solución C.....	49
4.3.3.	Evaluación de los principios de solución.....	50
4.4.	Diseño de materialización.....	51
4.4.1.	Seleccionar el programa de secado.....	51
4.4.2.	Dimensiones del secador.....	53
4.4.2.1.	Generación de alternativas de diseño.....	56
4.4.2.1.1.	Alternativa A.....	57
4.4.2.1.2.	Alternativa B.....	57
4.4.2.1.3.	Alternativa C.....	58
4.4.2.1.4.	Alternativa D.....	60
4.4.2.1.5.	Alternativa E.....	61
4.4.2.2.	Evaluación de alternativas de diseño.....	63
4.4.2.2.1.	Simulación y evaluación de la alternativa C.....	64
4.4.2.2.2.	Simulación y evaluación de la alternativa D.....	65
4.4.2.2.3.	Simulación y evaluación de la alternativa E.....	67
4.4.3.	Velocidad de los ventiladores.....	68
4.4.4.	Colector solar.....	72
4.4.4.1.	Análisis energético del colector solar plano.....	73
4.4.4.2.	Balace de energía en la cubierta de vidrio.....	74

4.4.4.3.	Balance de energía en la placa absorbadora.	80
4.4.4.4.	Balance de energía en el aire interior del colector.	81
4.4.4.5.	Eficiencia del colector solar.	83
4.4.4.6.	Datos meteorológicos de instituciones u observatorios.	83
4.4.4.6.1.	Base de datos INAMHI.	83
4.4.4.6.2.	Base de datos del CONELEC-CIE.	84
4.4.4.6.3.	Base de datos de la NASA.	85
4.4.4.7.	Datos principales del sistema colector solar.	87
4.4.4.8.	Cálculos respectivos del colector solar plano.	88
4.4.4.8.1.	Cálculo del rendimiento energético del colector solar plano.	90
4.4.4.8.2.	Cálculo de la energía útil del colector solar plano.	90
4.5.	Diseño de detalle.	91
CAPÍTULO V		94
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		94
5.1.	Conclusiones.	95
5.2.	Recomendaciones.	96
CAPÍTULO VI		97
BIBLIOGRAFÍA		97
Bibliografía		98
CAPÍTULO VII		103
ANEXOS		103

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Figura 1. El calor fluye en la dirección de la temperatura decreciente	16
Figura 2. Simulación CFD de una válvula en Ansys Discovery Live.....	18
Figura 3. Flujo de trabajo en ANSYS AIM para el análisis estático de un conjunto de manivela de una bicicleta.	19
Figura 4. Ubicación geográfica de la empresa PLANTABAL S.A.	28
Figura 5. Ubicación física de la empresa PLANTABAL S.A.....	29
Figura 6. Esquema de las fases del desarrollo de la función de calidad (QFD).....	35
Figura 7. Ingreso de datos en la casa de calidad de la matriz QFD.....	38
Figura 8. Simbología cualitativa de ponderación.	39
Figura 9. Correlaciones técnicas del cuerpo de la matriz QFD.....	39
Figura 10. Evaluación técnica de la matriz QFD.	40
Figura 11. Esquema de recirculación de aire caliente en el interior de la cámara de secado para madera de balsa.....	43
Figura 12. Esquema de circulación de aire caliente cuando el aire se encuentra saturado de humedad.	44
Figura 13. Black box de la función principal.	45
Figura 14. Estructura funcional de los modos de operación para el diseño de la cámara de secado híbrida para madera de balsa.	45
Figura 15. Estructura funcional del primer modo de operación.....	46
Figura 16. Estructura funcional del segundo modo de operación.....	47
Figura 17. Esquema referencial para la solución de diseño A.	48
Figura 18. Esquema referencial para la solución de diseño B.....	49
Figura 19. Esquema referencial para la solución de diseño C.....	50
Figura 20. Método de apilado de madera con paletas.	54
Figura 21. Disposición de la pila de madera perpendicular al flujo de aire caliente.....	56
Figura 22. Pilas de madera alineadas en fila.	57
Figura 23. Pilas de madera colocadas en 1 grupo escalonado.....	58
Figura 24. Pilas de madera colocadas en 2 grupos escalonados.....	58
Figura 25. Configuración geométrica del secador para la alternativa C.	59
Figura 26. Pilas de madera colocadas en dirección al flujo de aire.....	60
Figura 27. Configuración geométrica del secador para la alternativa D.	61
Figura 28. Pilas de madera colocadas en dirección longitudinal.....	61

Figura 29. Configuración geométrica del secador para la alternativa E.....	62
Figura 30. Condiciones de flujo para el volumen de control del secador.	63
Figura 31. Campos de dirección de velocidad en la simulación de la alternativa C.	64
Figura 32. Contornos de velocidad en la simulación de la alternativa C.	65
Figura 33. Campos de dirección de velocidad en la simulación de la alternativa D.....	66
Figura 34. Contornos de velocidad en la simulación de la alternativa D.	66
Figura 35. Campos de dirección de velocidad en la simulación de la alternativa E.	67
Figura 36. Contornos de velocidad en la simulación de la alternativa E.	68
Figura 37. Espacios huecos en la pila de madera para la circulación de aire caliente.	70
Figura 38. Modelo del ventilador con las características técnicas.	71
Figura 39. Esquema funcional del colector solar.	74
Figura 40. Esquema energético para la cubierta de vidrio.	75
Figura 41. Relaciones de transferencia de calor por radiación para algunas configuraciones de dos superficies.	76
Figura 42. Esquema energético para la placa absorbidora.....	80
Figura 43. Esquema energético para el flujo de aire en el colector.....	82
Figura 44. Insolación en el mes de enero sobre la superficie ecuatorial.	85
Figura 45. Ubicación de datos meteorológicos en el software RETScreen.	86
Figura 46. Datos meteorológicos proporcionados por el software RETScreen.	86
Figura 47. Gráfico de datos climatológicos radiación solar vs temperatura del aire.	87
Figura 48. Simulación para el cambio de posición de las pilas de madera.	91
Figura 49. Simulación del volumen de control para la cámara de secado con deflectores.	92
Figura 50. Deflectores usados para mejorar el desempeño del flujo interno de aire caliente.	92
Figura 51. Dimensiones modificadas de la cámara de secado.	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones del usuario.....	36
Tabla 2. Requerimientos técnicos de ingeniería.....	37
Tabla 3. Programa de secado recomendado para madera de balsa.....	52
Tabla 4. Datos del colector solar.....	87

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1	10
Ecuación 2	10
Ecuación 3	55
Ecuación 4	56
Ecuación 5	69
Ecuación 6	73
Ecuación 7	73
Ecuación 8	74
Ecuación 9	75
Ecuación 10	76
Ecuación 11	77
Ecuación 12	77
Ecuación 13	77
Ecuación 14	78
Ecuación 15	78
Ecuación 16	78
Ecuación 17	78
Ecuación 18	78
Ecuación 19	78
Ecuación 20	79
Ecuación 21	79
Ecuación 22	79
Ecuación 23	80
Ecuación 24	80

Ecuación 25	80
Ecuación 26	81
Ecuación 27	81
Ecuación 28	81
Ecuación 29	82
Ecuación 30	82
Ecuación 31	82
Ecuación 32	83
Ecuación 33	83
Ecuación 34	83
Ecuación 35	88
Ecuación 36	88

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Casa de la calidad de la matriz QFD aplicada al proceso de diseño de la cámara de secado híbrida para madera de balsa.	104
Anexo 2. Humedad relativa ambiente y contenido de humedad de equilibrio de la madera para diferentes temperaturas del bulbo seco y depresiones del bulbo húmedo.	105
Anexo 3. Programas de secado recomendados para diferentes especies de madera.	107
Anexo 4. Programas generales de temperatura para madera.....	109
Anexo 5. Programas generales de depresiones psicrométricas para madera.	109
Anexo 6. Características técnicas para ventiladores HCH/SEC.....	110

CÓDIGO DUBLIN

Título:	Diseño de una cámara de secado para madera balsa mediante el empleo de un sistema híbrido, para reducir la energía suministrada por la caldera a los hornos convencionales de secado.			
Autor:	<u>Pincay de la Rosa, Jair Ronaldo</u>			
Palabras clave:	Cámara de secado	Colector solar	Flujo de aire	Balsa
Fecha de publicación:				
Editorial:	Quevedo: UTEQ, 2021.			
Resumen:	<p>Resumen.- En la presente investigación se diseñó una cámara de secado híbrida que contribuya al aprovechamiento de la energía solar para el secado de la madera de balsa. En esta investigación, se aplicó la metodología del proceso de diseño de la ingeniería concurrente basado en las etapas de especificación, diseño conceptual, diseño de materialización y diseño de detalle. El diseño de la cámara de secado seleccionado en la etapa de conceptualización contiene los siguientes componentes: colector solar, ventiladores ubicados en la parte del colector, caldera de biomasa, serpentines y ventoleras. Las dimensiones del diseño propuesto son de 3.2 metros de longitud, 4.8 metros de ancho y 2.1 metros de altura, se compone de una cubierta de vidrio y debajo de ella se encuentra ubicada la placa absorbidora (pintada de color negro mate) con una inclinación de 10 grados. La eficiencia del colector solar plano es de 32.35 % y su energía útil es de 1.47 kilovatios al día, equivalente a 44 kilovatios al mes y 530 kilovatios de energía por año, aproximadamente. Por último, mediante simulación fluidodinámica se verificó que el diseño propuesto con deflectores en las esquinas de la cámara presenta una adecuada distribución de velocidades cuando el aire caliente fluye por la pila de madera.</p> <p>Abstract.- In this project, a hybrid drying chamber that contributes to the use of solar energy for the drying of balsa wood was designed. In this research, the methodology of the concurrent engineering design process was applied based on the stages of specification, conceptual design, materialization design and detail design. The design of the drying chamber selected in the conceptualization stage contains the following components: solar collector, fans located in the collector part, biomass boiler, coils and ventoleras. The dimensions of the proposed design are 3.2 meters long, 4.8 meters wide and 2.1 meters high, consists of a glass cover and below it is located the absorbent plate (painted matte black) with an inclination of 10 degrees. The efficiency of the flat solar 32.35 % collector is of and its useful energy is up to 1.47 kilovatios date, equivalent to the month 44 kilovatios and 530 kilovatios energy per year, approximately. Finally, fluid dynamic simulation verified that the proposed design with deflectors in the corners of the chamber has an adequate speed distribution when hot air flows through the wood pile.</p>			
Descripción:	130 hojas: Dimensiones, 29 x 21 cm + CD-ROM			
URI:				

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación se realiza con la finalidad de diseñar una cámara de secado híbrida que utilice paneles captadores solares y una caldera de vapor para el proceso de secado de la madera balsa.

En esta investigación se abordan conceptos del contenido de humedad que contiene la madera durante su proceso de secado considerando el programa de secado seleccionado por las empresas en el medio local, así como los parámetros de la transferencia de calor por convección que suceden en el interior de la cámara entre la madera y el flujo de aire caliente. La madera absorbe calor desde el aire caliente y como consecuencia se produce la pérdida de humedad.

Para el diseño de la cámara de secado híbrida propuesta en esta investigación, se toman en consideración las variables y factores que intervienen en el proceso de secado con hornos convencionales, así como el programa seleccionado para el secado de la balsa, de tal manera que garantice el menor deterioro posible de la madera.

En el diseño propuesto se usará colectores solares para reemplazar parcialmente el suministro de energía que ingresa a la cámara de secado desde la caldera, y en días nublados o nocturnos ingresará a funcionar la caldera de vapor para satisfacer la demanda de secado; con la finalidad de que se utilice el secado solar como prioridad para disminuir la humedad de la madera. La validación de la cámara de secado se efectúa mediante la simulación termo-fluidodinámica por el método de volúmenes finitos (FVM) en el software ANSYS Discovery Live versión estudiantil.

Finalmente, el objeto de esta investigación es efectuar un diseño que permita distribuir uniformemente el aire caliente por toda la superficie de las pilas de madera. Además, con los colectores solares ubicados en el techo de la cámara de secado, se trata de reducir el calor suministrado desde la caldera de vapor al horno, para mejorar la eficiencia energética del sistema.

CAPÍTULO I

CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Problema de investigación.

1.1.1. Planteamiento del problema.

Durante décadas, la madera ha sido calificada como una de las especies con mayor aporte al sistema industrial a nivel internacional. En Ecuador, la madera balsa es una de las especies que más se cultiva y se comercializa, siendo el país latinoamericano con mayor exportación de madera en mercados internacionales (China, Estados Unidos y algunos países europeos) en los últimos años.

La balsa cultivada en el país es usada casi en su totalidad para el comercio exterior, siendo las provincias de Los Ríos, Guayas, El Oro y Pichincha las zonas con mayor producción de madera a nivel nacional.

La madera balsa exportada es previamente trabajada en industrias, las cuales se encargan de aserrar, seleccionar y disminuir la humedad de la madera para luego procesarla en formas y tamaños predeterminados, generando de esta manera valor agregado para su posterior aplicación.

Uno de los procesos de producción más importantes en la madera es la reducción del contenido de humedad que contiene en su interior con el objetivo de obtener una especie con menor densidad y peso. Para ello, la madera aserrada es ingresada en hornos convencionales de calentamiento con la finalidad de sobreponerse a las limitaciones impuestas por las temperaturas y humedad relativa que ocurren en forma natural debido a las variaciones del clima.

Las calderas de vapor son una fuente de generación de calor y permiten elevar la temperatura en el interior de los hornos convencionales de secado de madera aserrada; cuya fuente calorífica de energía es proporcionada por la biomasa obtenida de los desperdicios de madera sin aplicación alguna.

El uso de biomasa en una caldera como alternativa a los combustibles fósiles presenta ventajas económicas y ambientales en comparación al diésel o gas, pero el enfoque medioambiental indica que la biomasa al ser quemada genera residuos volátiles y contaminantes que provocan problemas de salud de manera prolongada en las personas.

Por otra parte, el uso de secadoras solares se ha presentado como una alternativa ecológica en el aprovechamiento de la energía solar para el secado de madera aserrada; pero presentan inconvenientes en la operación del sistema, ya que en días lluviosos y nocturnos no es posible captar energía solar incrementando el tiempo de secado.

Finalmente, en el proceso de secado de la balsa suele existir una deficiente circulación del flujo de aire caliente en el interior de la cámara de secado, el cual no permite una adecuada distribución del calor y transporte de la humedad evaporada de la superficie en toda la pila de madera.

1.1.2. Formulación del problema.

Actualmente, el proceso de secado de la madera balsa en hornos convencionales presenta alternativas ecológicas que inciden de manera positiva en el aprovechamiento de energía solar sustentable al medio ambiente.

¿Cómo se puede reducir la energía suministrada por las calderas de vapor a las cámaras de secado para madera de balsa, de tal manera que se aproveche la energía térmica solar en las horas de radiación efectivas?

1.1.3. Sistematización del problema.

- ¿Es importante conocer la metodología del proceso de diseño de la ingeniería concurrente para generar y evaluar alternativas de diseño concretas?
- ¿Es posible realizar un diseño híbrido solar-caldera de una cámara para el secado de madera de balsa aserrada?
- ¿Cómo se determina el rendimiento energético de un colector solar plano considerando el balance de energías del sistema?
- ¿Es necesario realizar la verificación del diseño de la cámara de secado propuesto mediante el modelado termo-fluido dinámico por el método de volúmenes finitos (FVM) para evaluar el comportamiento del flujo de aire?

1.2. Objetivos.

1.2.1. Objetivo general.

Diseñar una cámara de secado para madera balsa mediante el empleo de un sistema híbrido, reduciendo la energía suministrada por la caldera a los hornos convencionales de secado.

1.2.2. Objetivos específicos.

- Aplicar la metodología del proceso de diseño de la ingeniería concurrente basado en el diseño conceptual, materialización y detalle.
- Diseñar la cámara de secado mediante el software de diseño Autodesk Inventor versión estudiantil.
- Determinar el rendimiento energético del colector solar plano mediante un modelo matemático de balance de energías del sistema.
- Evaluar el funcionamiento de la cámara de secado propuesto mediante el modelado fluido dinámico en el software ANSYS Discovery Live.

1.3. Justificación.

El presente trabajo de investigación tiene como objetivos esenciales reducir la energía suministrada por la caldera a los hornos convencionales de secado usados en la empresa, y como consecuencia, se trata de disminuir la expulsión de gases nocivos que contaminan el medio ambiente.

En las industrias madereras, la reducción de la humedad de la balsa se realiza en cámaras convencionales de secado, en donde el calor generado lo produce una caldera de vapor con consumos energéticos altos. Como alternativa para abastecer el consumo de energía, utilizan los desperdicios de madera los cuales son quemados, y como consecuencia se producen gases tóxicos y altamente contaminantes para el medio ambiente.

Por lo tanto, esta investigación tiene como finalidad principal plantear una alternativa ecológica que disminuya la energía que suministra la caldera de vapor a la cámara de secado (producidos por quemar desechos de madera), y a su vez se evita contaminar el medio natural. Para ello, se pretende diseñar una cámara de secado híbrida mediante la combinación de un sistema de colectores solares y caldera de vapor. La caldera de vapor ingresará a funcionar en situaciones extremas, en días nublados u horarios nocturnos.

Finalmente, este estudio investigativo también tiene como alcance realizar la evaluación del diseño, mediante la simulación fluidodinámica por el método de volúmenes finitos (FVM) en el software ANSYS Discovery Live, y de esta manera se trata de determinar si la cámara de secado propuesta cumple con los objetivos planteados, dando solución al problema principal de esta investigación.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. Marco conceptual.

2.1.1. Madera de balsa.

Ochroma pyramidale Cav., conocido comúnmente como balsa, guano, corcho, lana, pau de balsa y bois flot, es una especie de crecimiento rápido y produce una madera de muy baja densidad que se usa para juguetes, artesanías, chapa de interiores y material aislante [1].

La madera de la balsa es la madera comercial más liviana en uso a nivel mundial hoy en día. La madera comercial de la balsa por lo usual varía en densidad entre 0.10 a 0.17 g/cm³, pero puede variar entre 0.05 y 0.41 g/cm³. La madera de balsa se seca rápidamente y con poca degradación. El secado al horno, en particular con provisiones de mayor grosor, rinde un producto mucho mejor que el secado al aire. El encogimiento durante el secado de verde a un nivel de humedad del 12 por ciento es de 1.6 por ciento radial y 4 por ciento tangencial [1].

De acuerdo con el estudio *Caracterización del cultivo de balsa en la provincia de Los Ríos, Ecuador*, elaborado por estudiantes de la Universidad Técnica de Quevedo, en el país existen más de 20.000 ha de plantaciones de madera de balsa, entre bosques naturales y reforestados. Las zonas de mayor producción están en las provincias de Guayas, El Oro, Los Ríos y Pichincha [2].

Para el año 2015, el Ecuador exportaba más de 90% de la madera de balsa que se comercializa al mundo. El ambiente, la altitud y el clima del país brindan una madera más estable y densa, un requerimiento importante de los compradores en el exterior [2].

El crecimiento de este árbol toma normalmente entre cuatro y seis años, siendo uno de los más rápidos del mundo en desarrollarse, lo que no solo facilita su cultivo, sino que hace que este se halle muy vinculado con la conservación del ambiente [2].

La madera de balsa tiene una gran cantidad de usos profesionales e industriales. Se la utiliza para elaborar maquetas y modelos a escala, muebles, equipos acústicos, artesanías, juguetes, interiores en construcciones, material aislante para los aviones, producción de pulpa o papel y otros [2]. Se usa también como material aislante masivo y libre de fuerzas electrostáticas en barcos para transporte criogénico [1].

2.1.2. Madera aserrada.

La madera aserrada es la pieza proveniente del seccionado de una troza de madera [3], mediante cortes longitudinales y/o transversales, realizados con sierras normales o con sierra eléctrica [4].

Se denomina madera aserrada estructural a la que ha sido sometida a un procesado mínimo de transformación que no incluye ni encolados ni ensambles de unión dentada, y que se obtiene mediante aserrado longitudinal del tronco y cepillado. Según las dimensiones, es habitual referirse a ellas como listones, tablas, tablones, madera escuadrada o madera de gruesa escuadría [5].

2.1.3. Pie tablar.

En el comercio de madera aserrada entre los cuales se puede mencionar tablas, vigas, listones, cuarterones y madera dimensionada, la comercialización se realiza en pie tablar, donde esta unidad de mercadeo se maneja tanto a nivel nacional como internacional [6].

Un pie tablar es equivalente al resultado de la medición de una pieza de madera aserrada con las siguientes medidas: un pie de ancho por un pie de alto y de espesor una pulgada [6].

2.1.4. Cubicación de la madera (factor de apilado).

La forma de conocer el volumen de madera de un árbol en pie, árbol tumbado (rollizo) o de madera aserrada ya sea con motosierra o en aserradero es mediante la cubicación [6].

La cubicación es un procedimiento en el cual se toman datos reales de las dimensiones de los árboles en pie, árbol tumbado (diámetro mayor, diámetro menor y largo) o madera aserrada (ancho, largo y espesor), utilizando un instrumento de medida como es el caso del flexómetro o wincha métrica [6].

La cubicación de balsa movilizada en vehículos se realiza de la misma manera que la cubicación de madera aserrada. Pero debido a que a menudo las piezas de balsa son de baja densidad, se arquean provocando mayores espacios en la carga, por lo tanto, se debe aplicar un factor de conversión denominado factor de apilado [7].

El factor de conversión que se debe aplicar en el apilado es de 0,80 fundamentado en el estudio técnico que el Distrito Forestal de Los Ríos, la Oficina Técnica Forestal de Santo Domingo y “Vigilancia Verde” realizaron en forma conjunta con las empresas que trabajan con balsa en Santo Domingo y Quevedo, en centros de acopio [7].

La fórmula básica para calcular el volumen neto de madera aserrada apilada se indica en la siguiente ecuación:

$$V = l * a * h * f_a \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

V : es el volumen neto de madera aserrada.

l : es la longitud de la carga.

a : es el ancho de la carga.

h : es la altura de la carga.

f_a : es el factor de conversión o apilado.

2.1.5. Humedad de la madera.

El contenido de humedad en una pieza de madera es la relación que existe entre el peso del agua que contiene y su peso en estado seco (anhidro), expresado en porcentaje. El contenido de humedad es un factor muy importante en el uso de la madera, puesto que de él depende una buena parte de sus propiedades físicas y mecánicas [8].

Para su cálculo se utiliza la siguiente fórmula:

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

Donde:

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

$P.V$: Peso de la madera en estado verde o peso inicial (gramos).

$P.S$: Peso de la madera seco el horno o anhidro (gramos).

La madera es considerada seca si el CH es de 19% o menos, cuando el valor se encuentra cercano o arriba del 30%, la madera se encuentra en el punto de saturación de la fibra (PSF), un valor importante para la contracción y el hinchamiento. La pudrición ocasionada por hongos generalmente no se presenta en contenidos de humedad igual o superiores al (PSF) ni en CH inferiores al 10% [9].

2.1.6. Secado de la madera.

El secado de madera en los hornos depende de tres factores principales, que son la velocidad del aire, la humedad relativa y la temperatura del aire que rodea al horno de secado [10].

Se debe secar la madera hasta un CH% lo más próximo posible al contenido de humedad de equilibrio con el medio ambiente (humedad de servicio). La madera estructural debe tener un CH inferior a 19%. La madera a ser laminada debe tener una humedad de 12%, al momento de ser procesada. La comprobación del contenido de humedad se puede hacer mediante el uso del xilohigrómetro o medidor eléctrico de humedad [4].

2.1.6.1. Proceso de secado de madera.

Los procesos de secado de madera se pueden realizar de varias formas, las más comunes son:

- **Secado al aire libre.** Consiste en colocar la madera convenientemente al aire libre, para que con el tiempo dicha madera alcance la humedad de equilibrio higroscópico del aire que la rodea. Este proceso no es muy conveniente, ya que tarda mucho tiempo en secar la madera [10].
- **Secado de deshumidificación o bomba de calor.** Se basa fundamentalmente en crear una atmósfera seca alrededor de la madera. Este tipo de secado es mucho más lento, se necesitan varias semanas o meses para completar el secado [10].
- **Secado artificial.** Consiste en crear alrededor de la madera unas condiciones ambientales artificiales de presión, temperatura y humedad, muy por debajo de la humedad de equilibrio de la madera, lo que proporciona su secado rápido [10].

2.1.7. Cámara de secado convencional para madera (hornos convencionales)

Un horno convencional usa el calor proporcionado por un quemador o una caldera y un intercambiador de vapor o agua caliente, para calentar la cámara del horno y quitar el agua de la madera, la que es convertida en vapor y extraída del horno con el aire caliente. De acuerdo a dicho concepto, este proceso requiere de una gran pérdida de calor para secar, pues tanto el vapor como el aire caliente contienen energía transferida que se lanzan al ambiente exterior del horno [11].

2.1.8. Caldera de vapor

Según [12] una caldera es todo aparato a presión en donde el calor procedente de cualquier fuente de energía se transforma en utilizable, en forma de calorías, a través de un medio de transporte en fase líquida o vapor.

Las calderas de vapor son dispositivos normalmente diseñados para generar vapor saturado o, en menor medida, sobrecalentado. Este vapor se genera a través de una transferencia de calor a presión constante, en la cual el fluido, originalmente en estado líquido, se calienta hasta que cambia de estado [13]. Este tipo de calderas utilizan como fluido caloportante o medio de transporte el vapor de agua [12].

2.1.9. Cámara de secado solar para madera

El secador solar de madera, es un equipo diseñado para el secado total de la madera, desde la humedad inicial de punto de corte, hasta una humedad final de 8 a 10%, dependiendo de la especie en proceso de secamiento [14].

El secador solar de madera, tiene un rango de operación que va desde una humedad inicial cercana al 50% hasta una humedad final del 8%, humedad final que es recomendada para la madera que va a ser utilizada para muebles de exportación [14].

Los secadores de madera que utilizan la energía solar para incrementar la temperatura en la cámara de secado, surgen como alternativa que contribuye a satisfacer las necesidades de las industrias forestales, ayudan a reducir contenidos de humedad, tiempos de secado y mejoran la calidad de la madera sin alta inversión a diferencia de los hornos convencionales [15].

Los secadores solares constan de cuatro partes fundamentales (colector solar, cámara de secado, ventiladores y ventilas) y tienen la capacidad de almacenar el calor que es generado por la incidencia de los rayos solares sobre un colector de temperatura, disminuyendo la humedad relativa del aire, lo que se traduce en tiempos de secado más cortos [15].

Como se indica en [16], existen ciertas ventajas que diferencian a un secador solar ante los hornos convencionales de secado:

- Menor costo de construcción.
- Materiales de fácil acceso para su construcción.
- Bajos costos de operación.
- No hay emisiones de gases contaminantes a la atmosfera.

- Pueden ser utilizados en zonas aisladas y de difícil acceso.

Además, en [16] consideran que un secador solar presenta ciertas desventajas que deben tomarse en consideración al momento de implementar un diseño como este:

- Dependen de las condiciones climatológicas.
- Su eficiencia disminuye durante en el invierno y durante la noche.
- Su eficiencia disminuye cuando aumenta el volumen a secar.

2.1.10. Cámara de secado híbrida para madera

Un secador híbrido solar-biomásico, es una cámara de secado acondicionada para madera, donde la energía térmica necesaria para el proceso de secado es proporcionada por dos fuentes [14]:

- Calefacción solar, la cual se obtiene a partir de la conversión de los rayos del sol en energía solar térmica.
- Calefacción con biomasa, la cual se obtiene por medio del proceso de gasificación y/o combustión de los desechos, resultado de la madera trabajada.

De esta manera, el sistema de calefacción con biomasa (caldera) sirve como un sistema de respaldo en el caso de falta de radiación solar (días nublados) o cuando se requiere tener un secado continuo día y noche [14].

2.1.11. Energía solar

La energía solar es la energía obtenida directamente del Sol. La radiación solar que incide en la Tierra puede aprovecharse de dos maneras [17]:

- **Transformación de la radiación solar en calor:** se denomina energía solar térmica. Consiste en transformar la radiación solar en calor, se puede aprovechar para producir agua caliente destinada al consumo doméstico y generar energía mecánica y eléctrica.
- **Transformación de la radiación solar en electricidad:** se denomina energía solar fotovoltaica. Esta transformación se lleva a cabo en los elementos semiconductores que integran los paneles solares fotovoltaicos. La electricidad puede ser utilizada de forma directa, almacenada en baterías, e incluso se puede inyectar en la red de distribución eléctrica.

Las ventajas de las aplicaciones de la energía solar radican en que es una energía inagotable y en abundancia, no es contaminante y de un bajo costo de inversión relativo. Entre sus desventajas podemos acotar, que es una energía diluida e intermitente, por lo que requiere frecuentemente un sistema de acumulación [18].

2.1.12. Biomasa

La biomasa es un material de origen biológico, esto incluye materiales derivados de plantas y animales. Diversas industrias, como la industria del papel, agricultura y alimenticia producen residuos de biomasa. Esta biomasa es usada frecuentemente para obtener energía, pero también se suele desperdiciar [19].

La combustión de biomasa sólida renovable no aumenta el dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera global. Se puede suponer que el dióxido de carbono liberado durante la quema de combustibles renovables se recicla en dióxido de carbono que los bosques usan para crecer. Los biocombustibles (biomasa) son muy volátiles. Esto puede estar asociado con su contenido relativamente alto de oxígeno (O) e hidrógeno (H). La porción de volátiles en la mayoría de los biocombustibles es de alrededor del 70% al 80%. El contenido de carbono y los valores caloríficos son bajos en comparación con los combustibles fósiles [19].

2.1.12.1. Combustión de biomasa.

Se puede suponer que la combustión de biomasa sucede en cuatro etapas. En la primera etapa, la biomasa se seca cuando es ingresada al horno y comienza a recibir calor. El calor aumenta la temperatura de la superficie de la biomasa y comienza a evaporar el agua. El vapor de agua generado sale a través de los microporos de la biomasa [19].

La liberación de volátiles es la segunda etapa, cuando aumenta la temperatura de las partículas de biomasa, comienzan a aparecer compuestos de peso molecular pequeño. La presión del gas aumenta y los gases salen a través de los microporos en la partícula de biomasa en combustión. Normalmente, la velocidad de reacción es lo suficientemente alta como para que el oxígeno no pueda penetrar dentro de la biomasa en combustión [19].

Después de la liberación de los volátiles, el carbón restante continúa teniendo reacciones. La temperatura de las partículas de biomasa aumenta y en esta tercera etapa la mayor parte del hidrógeno ha reaccionado. El principal componente combustible restante es el carbono. Este carbono restante reacciona lentamente a través de la gasificación con CO, la gasificación con

H₂O y, en menor medida, con reacciones de oxígeno. Los gases de combustión salen a través de los microporos en el carbón y la partícula de biomasa brilla [19].

En la cuarta etapa, la ceniza restante sufre más reacciones, dependiendo del entorno. La mayor parte de la biomasa ha reaccionado y solo queda la parte inorgánica (Fe, SO₄, CO₃, Mg, Si, Ca, etc.). A menudo pensamos en la ceniza como estable y no reactiva, pero los inorgánicos restantes continúan sus reacciones (por ejemplo, oxidación). La formación de partículas de ceniza continúa con una posible aglomeración y deposición superficial [19].

2.1.12.2. Emisiones

- Emisiones de NO_x.
- Emisiones de SO₂.
- Emisiones de monóxido de carbono.
- Compuestos de azufre reducido total.
- Compuestos orgánicos volátiles y emisiones orgánicas.
- Emisiones de polvo.

2.1.13. Transferencia de calor y masa.

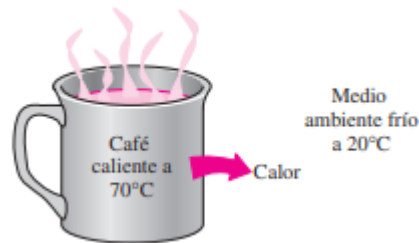
La transferencia de calor y de masa es una ciencia básica que trata de la rapidez de transferencia de energía térmica. Tiene una amplia área de aplicación que va desde los sistemas biológicos hasta aparatos domésticos comunes, pasando por los edificios residenciales y comerciales, los procesos industriales, los aparatos electrónicos y el procesamiento de alimentos [20].

2.1.13.1. Transferencia de calor.

El calor es la forma de la energía que se puede transferir de un sistema a otro como resultado de la diferencia en la temperatura. La ciencia que trata de la determinación de las razones de esa transferencia es la transferencia de calor [20].

La determinación de las razones de transferencia del calor hacia un sistema y desde éste y, por lo tanto, los tiempos de enfriamiento o de calentamiento, así como de la variación de la temperatura, son el tema de la transferencia de calor [20].

Figura 1. El calor fluye en la dirección de la temperatura decreciente



FUENTE: YUNUS A. CENGEL AND AFSHIN J. GHAJAR

2.1.13.2. Transferencia de masa

La transferencia de masa es masa en movimiento como resultado de una diferencia de concentración de especies en una mezcla. Así como un gradiente de temperatura constituye el potencial impulsor de la transferencia de calor, un gradiente de concentración de especies en una mezcla proporciona el potencial impulsor del transporte de esa especie [21].

Un ejemplo es la dispersión de óxidos de azufre liberados por la chimenea de una central eléctrica al medio ambiente. Otro ejemplo es la transferencia de vapor de agua al aire seco, como en un humidificador doméstico [21].

2.1.13.3. Transferencia de calor en la ingeniería.

El equipo de transferencia de calor como los intercambiadores de calor, las calderas, los condensadores, los radiadores, los calentadores, los hornos, los refrigeradores y los colectores solares está diseñado considerando el análisis de la transferencia de calor [20].

2.1.14. Método de volúmenes finitos (FVM)

El método de volumen finito es un método numérico para resolver problemas de ingeniería y física matemática. Las áreas de problemas típicas de interés en ingeniería y física matemática que se pueden resolver mediante el uso del método de elementos finitos incluyen análisis estructural, transferencia de calor, flujo de fluidos, transporte de masa y potencial electromagnético [22].

La formulación de elementos finitos del problema da como resultado un sistema de ecuaciones algebraicas simultáneas para su solución, en lugar de requerir la solución de ecuaciones diferenciales. Estos métodos numéricos producen valores aproximados de las incógnitas en números discretos de puntos en el continuo. Por lo tanto, este proceso de modelar un cuerpo dividiéndolo en un sistema equivalente de cuerpos o unidades más

pequeñas (elementos finitos) interconectados en puntos comunes a dos o más elementos (puntos nodales o nodos) y/o líneas y/o superficies límite se llama discretización [22].

En el método de los volúmenes finitos, en lugar de resolver el problema de todo el cuerpo en una sola operación, se formulan las ecuaciones para cada elemento finito y se las combina para obtener la solución de todo el cuerpo. La solución para problemas de termofluidos se refiere típicamente a determinar las incógnitas nodales pueden ser, por ejemplo, temperaturas o presiones de fluidos debido a flujos térmicos o de fluidos [22].

2.1.15. Software Ansys Discovery Live

Ansys Discovery es la primera herramienta de diseño basada en simulación que combina simulación de física instantánea, simulación de alta fidelidad probada de Ansys y modelado de geometría interactiva en una sola experiencia de usuario [23].

En [23] se indica que actualmente se ha demostrado que la simulación inicial aumenta el ROI (retorno sobre la inversión) en una organización al:

- Disminuir los costos de mano de obra de ingeniería y prototipos físicos.
- Reducir drásticamente los costos de creación de prototipos y pruebas.
- Minimizar las órdenes de cambio de ingeniería y maximizar sus alternativas de diseño e ideas.

Ansys Discovery Live ofrece simulación instantánea en 3-D, fuertemente acoplada al modelado de geometría directa, para permitir la exploración de diseño interactivo y la innovación rápida de productos. Es una experiencia interactiva en la que puede manipular geometría, tipos de materiales o entradas de física, y ver instantáneamente cambios en el rendimiento [24].

2.1.15.1. Análisis fluidodinámico

Discovery Live proporciona retroalimentación, pero también capacidades de resolución y visualización casi instantáneas. Además, es posible crear una nueva geometría dentro del flujo o editar recursos existentes, y sus actualizaciones ocurrirán en vivo [24].

2.1.15.2. Análisis térmico.

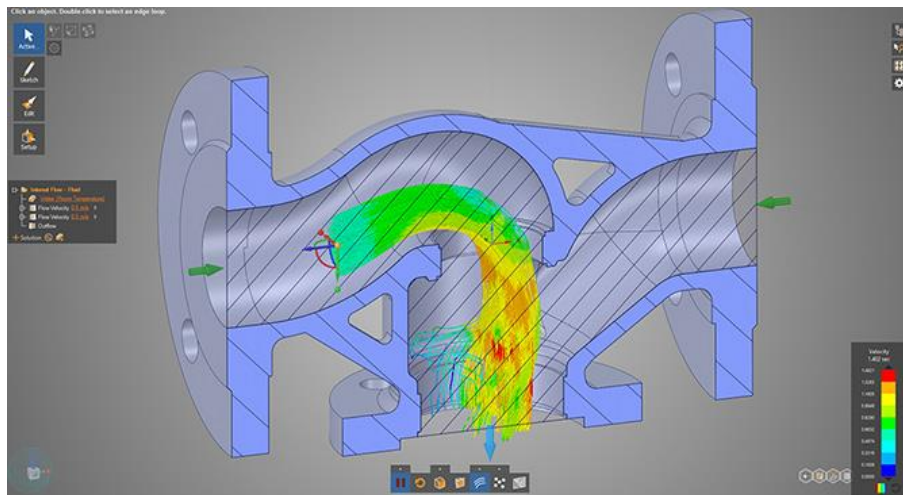
Ansys Discovery Live proporciona datos en tiempo real sobre la distribución de la temperatura a medida que se hace cambios en el modelo 3-D, o se cambia las características de entrada, como el flujo de calor y el tipo de material. Más importante aún, Discovery Live

permite probar ideas en tiempo real para alcanzar los objetivos de diseño en una fracción del tiempo [24].

2.1.15.3. Fortalezas clave del Ansys Discovery Live

- **Velocidad.** La simulación es tan rápida que parece "en vivo". La potencia computacional de las GPU junto con una arquitectura eficiente de Ansys hace posible esta velocidad [25].
- **Facilidad de uso.** Se elimina el mallado y el software toma todas las decisiones de configuración de la simulación para que el usuario pueda concentrarse en la física y no en el solucionador [25].
- **Nuevos métodos.** Los nuevos métodos de simulación permiten la simulación de geometría CAD sucia o datos facetados como un archivo STL. Estos enfoques también significan que la complejidad del modelo no ralentizará el tiempo de resolución [25].
- **Interactividad.** La funcionalidad interactiva permite a los ingenieros cambiar la física, la geometría y las pantallas de resultados sobre la marcha, lo que permite la exploración de ideas tan rápido como ocurren [25].

Figura 2. Simulación CFD de una válvula en Ansys Discovery Live.



FUENTE: ANSYS

2.1.16. Software Ansys AIM

Discovery AIM facilita la simulación inicial combinando flujos de trabajo intuitivos y orientados, resultados de simulación precisos y optimización en una herramienta de simulación completa. Si una simulación incluye electromagnetismo, térmica, estructural o fluidodinámica, todos los aspectos del flujo de trabajo de simulación se incluyen en una sola

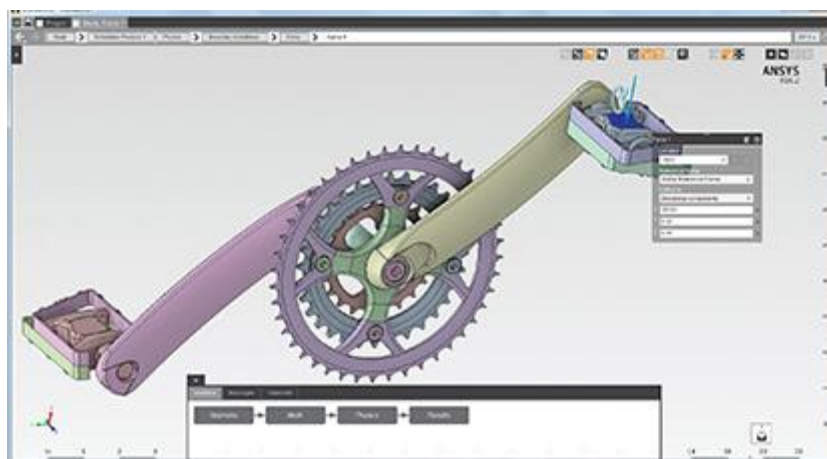
interfaz, lo que permite predecir el rendimiento completo del producto con resultados que se pueden confiar [26].

Discovery AIM integra perfectamente diseño y simulación, ayudando a explotar ideas y conceptos en mayor profundidad con una plataforma única para el desarrollo de productos [26].

2.1.16.1. Personalización de los flujos de trabajo de simulación.

Basado en la plataforma Workbench fácilmente personalizable, el entorno de usuario de Ansys AIM proporciona herramientas para crear scripts y personalizar este entorno para automatizar los flujos de trabajo de simulación. Para permitir más fácilmente la implementación de la simulación en grupos de diseño, AIM permite la creación de plantillas personalizadas que se pueden adaptar para seguir el proceso de simulación específico [27].

Figura 3. Flujo de trabajo en ANSYS AIM para el análisis estático de un conjunto de manivela de una bicicleta.



FUENTE: ANSYS

2.1.16.2. Simulación multifísica en AIM.

Para maximizar el rendimiento y la confiabilidad del producto, los ingenieros consideran de forma rutinaria cómo interactúan varias físicas con los usos en servicio de los productos que están desarrollando. AIM permite a los ingenieros simular interacciones multifísica para garantizar que los diseños de productos funcionen en entornos del mundo real [27].

Para evaluar el rendimiento térmico y de fluidos de los diseños de productos, AIM incluye flujo de fluido en estado estacionario y transferencia de calor para evaluar flujos laminares y turbulentos, transferencia de calor conjugada (CHT) para determinar temperaturas de

fluidos y sólidos, efectos de flotabilidad de fluidos para examinar convección natural, efectos de compresibilidad para modelar flujos de gas a alta velocidad [27].

Las capacidades de simulación multifísica de AIM permiten la simulación en una amplia gama de aplicaciones industriales, como el rendimiento estructural y de fluidos de válvulas, dispositivos de control de flujo e instrumentos de medición de procesos; cargas de viento y fluidos en estructuras; temperatura y estrés en intercambiadores de calor, componentes de motores y dispositivos electrónicos; y distribución de corriente, temperatura y tensión en fusibles y barras [27].

2.2. Marco referencial.

El presente trabajo de investigación efectuado con la finalidad de encontrar alternativas útiles para el secado de la madera de balsa, de tal forma que se utilice energía sustentable, como el aprovechamiento de la radiación solar, sin arriesgar los tiempos de secado de la madera aserrada. Por tal motivo, se realiza un estudio bibliográfico y referencial de investigaciones que hayan aportado al diseño de un sistema híbrido que se encuentre en funcionamiento durante el día y noche, en cualquier circunstancia climática.

Contreras [28] en su trabajo investigativo realizó un estudio de diseño, funcionamiento y costo de fabricación de un secador solar para madera aserrada, con el propósito de ser usado en la ciudad de Cuenca para lo cual se consideró como modelo el secador solar con colector integrado en el techo y estructurado con material aislante.

Por otra parte, en el trabajo investigativo realizado por De León [29] hace referencia que, para el aprovechamiento de la energía solar, diseñó un secador híbrido para madera, compuesto de captadores solares y un deshumidificador. En horarios nocturnos o en condiciones climáticas desfavorables, ingresa a funcionar automáticamente el deshumidificador, el cual se acciona cuando la humedad relativa en el interior de la cámara es elevada. Para este diseño, considerando el volumen útil del secador de 15.24 m³ y 10 horas de captación solar diaria, se obtuvieron tiempos de secado de 7.3 días y 10.3 días para tablas de 16ft x 12in x 1in (155 tablas) y 16ft x 4in x 2in (330 piezas), respectivamente; pero los tiempos se reducen a la mitad si el secador funciona con el deshumidificador.

Altartec [14], una empresa concebida con la vocación de desarrollar propuestas en el ámbito de las energías renovables, desarrolló un secador híbrido solar con caldera, acondicionado para el secado de madera aserrada desde la humedad inicial de punto de corte (cercana al

50%) hasta una humedad final entre 8 y 10%, dependiendo de la especie en proceso de secado. En esta propuesta el calor es proporcionado por el colector solar y el sistema de calefacción con biomasa (caldera), el cual funciona como respaldo cuando se requiera mantener un secado continuo durante día y noche o cuando exista deficiente radiación solar en días nublados.

En la investigación desarrollada por Altertec [14] se obtuvieron resultados favorables para el diseño propuesto, los cuales se redactan a continuación:

- El tiempo de secado se reduce significativamente en comparación con el secado al aire libre.
- La cámara de secado híbrida permite alcanzar el contenido de humedad final deseado.
- El valor agregado y la calidad de la madera permite la rápida recuperación de la inversión inicial para el secador solar.
- El diseño propuesto reduce las pérdidas de la madera.
- La cámara de secado híbrida permite trabajar la madera en cualquier estación de tiempo.

En la investigación realizada por Rojas [30], determinó las ecuaciones de balance de energía en un horno de secar madera y se calculó el consumo energético para tres valores de humedad inicial: 62, 72 y 82 % base seca. Las dimensiones de la cámara de secado: 5,81 x 1,66 x 2,23 m (largo x alto x ancho), el volumen de madera, cedro blanco, fue de $V=10,93$ m³. El mayor consumo energético se obtuvo en la etapa 1 donde se precalienta la madera y la estructura del horno desde sus condiciones iniciales hasta la temperatura de bulbo seco fijada, esta energía disminuye en la medida que decrece la humedad inicial y se debe utilizar para calcular el sistema de calentamiento.

El objetivo del estudio, “Evaluación de programas de secado para madera de chalamite (*Pinus pseudostrobus*)” desarrollado por Aquino et.al. [31], fue analizar el secado técnico convencional de la madera aplicando dos programas de secado: uno acelerado con temperatura inicial de 76 °C y final de 87 °C y otro suave con temperatura inicial de 60 °C y final de 82 °C, combinado con dos velocidades de aire: 2,05 m/s y 3,35 m/s. Las variables respuesta evaluadas fueron: tiempo de secado y calidad de la madera seca. De acuerdo con los resultados el tiempo de secado es afectado por la intensidad del programa, y la calidad de la madera depende del programa de secado y de la velocidad del aire. Estadísticamente

se observó que un programa de secado con temperaturas de 76 °C a 87 °C y velocidad de aire de 3.35 m/s redujo el tiempo de secado y la generación de defectos en la madera seca.

El trabajo efectuado por Ignacio [32] plantea un diseño de un secador convectivo, en el cual la velocidad del aire que circula entre la carga de madera sea uniforme, con lo cual se obtiene un secado homogéneo. El diseño de forma rectangular con esquinas superiores redondeadas con un radio de curvatura de 0.60 m, con los ventiladores colocados en la parte superior central y los calentadores en forma horizontal, resultó el mejor concepto de diseño. En esta investigación se obtuvo como resultado que la distribución de la velocidad del aire es afectada por la geometría interna del secador, el tipo y la posición de los dispositivos que se colocaron en el interior del secador mejoraron la distribución del flujo de aire y proporcionaron la mejor uniformidad en la velocidad del aire en el interior de la carga.

2.2.1. La ingeniería concurrente.

En los años 80 del siglo pasado, se acuñó el término ingeniería concurrente (CE) para indicar una forma de trabajar en el desarrollo y diseño de productos para satisfacer las demandas de los consumidores en menos tiempo, con menos errores y menores costos. La CE estaba destinada a mejorar la competitividad de la industria, especialmente en Occidente, para ponerse al día con la ventaja obtenida por empresas japonesas como Toyota [33].

La ingeniería concurrente es un enfoque sistemático para el diseño integrado y concurrente de productos y sus procesos relacionados, incluida la fabricación y el soporte. Este enfoque tiene la intención de hacer que los desarrolladores desde el principio consideren todos los elementos del ciclo de vida del producto desde la concepción hasta la eliminación, incluidos el costo de calidad, el cronograma y los requisitos del usuario [33].

La CE también es una estrategia comercial a largo plazo, que promete y proporciona beneficios a largo plazo a las empresas, cuando se implementa correctamente. Da forma a una organización ágil y flexible para lograr una ventaja competitiva a largo plazo. Los principales requisitos previos de la EC son la comunicación fluida entre las partes interesadas, su voluntad y capacidad para cooperar y un gran apoyo de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) [33].

La ingeniería concurrente (EC) ha sido un tema importante en los años 80 y 90 del siglo anterior en la investigación y la práctica. Su principal objetivo es reducir el tiempo de comercialización, mejorar la calidad y reducir los costos teniendo en cuenta los requisitos

posteriores y las limitaciones que ya se encuentran en la fase de diseño. Al comenzar con una alineación diseño-fabricación, gradualmente la forma de pensar de CE se ha extendido para incorporar más funciones del ciclo de vida junto con un mayor enfoque y participación tanto de clientes como de proveedores [33].

La aplicación de la CE en la práctica ha supuesto un notable ahorro de costes, una reducción del tiempo y una mejora de la calidad. Sin embargo, también se han informado muchos fallos. A menudo, el complejo sistema de CE no se ha entendido suficientemente bien, en particular porque el sistema que se necesita para comercializar, producir, vender y mantener el nuevo producto, el llamado sistema de producción, no se ha considerado suficientemente. Las propiedades particulares del sistema de producción que se necesitan para que el nuevo producto sea realmente un éxito deben entenderse bien, porque influyen en gran medida en el proceso de CE [33].

La esencia de CE ha sido la ejecución concurrente de procesos de diseño con el diseño de procesos posteriores, en particular la fabricación. Se formaron equipos de múltiples funciones y disciplinas para discutir propuestas de diseño desde diferentes puntos de vista multidisciplinares. En estos equipos, las disciplinas de diseño, fabricación y montaje, marketing y compras estaban representadas a menudo [33].

La CE tiene tres elementos básicos: la participación temprana de los participantes, el enfoque en equipo y el trabajo simultáneo en las diferentes fases del desarrollo del producto. Los equipos de CE generalmente constan de las funciones de marketing, ingeniería de productos, ingeniería de procesos, planificación de fabricación y actividades de abastecimiento. El enfoque principal fue la integración y la alineación entre las funciones de diseño y fabricación, teniendo en cuenta las demandas de los consumidores y las capacidades de los proveedores [33].

2.2.2. Diseño conceptual.

El diseño conceptual es la parte del proceso de diseño en la que, al identificar los problemas esenciales a través de la abstracción, establecer estructuras funcionales, buscar principios de trabajo apropiados y combinarlos en una estructura de trabajo, la ruta de solución básica se establece mediante la elaboración de un principio de solución [34].

2.2.3. Diseño de materialización.

El diseño de materialización es la parte del proceso de diseño en la que, a partir de la solución o concepto principal de un producto técnico, el diseño se desarrolla de acuerdo con criterios técnicos y económicos y a la luz de información adicional, hasta el punto en el que el diseño de detalle posterior. Puede conducir directamente a la producción [34].

2.2.3.1. Pasos del diseño de materialización.

Habiendo elaborado la solución principal durante la fase conceptual, las ideas subyacentes ahora pueden afirmarse. Durante la fase de realización a más tardar, los diseñadores deben determinar el diseño de la disposición general (disposición general y compatibilidad espacial), los diseños de forma preliminares (formas y materiales de los componentes) y los procesos de producción, y proporcionar soluciones para las funciones auxiliares. Durante todo esto, las consideraciones tecnológicas y económicas son de suma importancia. El diseño se desarrolla con la ayuda de dibujos a escala, se revisa críticamente y se somete a una evaluación técnica y económica [34].

En otras palabras, el diseño definitivo debe desarrollarse hasta el punto en que se pueda llevar a cabo una verificación clara de funcionamiento, durabilidad, producción, montaje, operación y costos. Solo cuando esto se haya hecho es posible preparar los documentos finales de producción [34].

A diferencia del diseño conceptual, el diseño de la encarnación implica una gran cantidad de pasos correctivos en los que el análisis y la síntesis se alternan y complementan constantemente. Esto explica por qué los métodos familiares que subyacen a la búsqueda de soluciones y evaluación deben complementarse con métodos que faciliten la identificación de errores (fallas de diseño) y la optimización. La recopilación de información sobre materiales, procesos de producción, piezas repetidas y estándares implica un esfuerzo considerable [34].

El proceso de realización es complejo porque:

- Muchas acciones deben realizarse simultáneamente.
- Se deben repetir varios pasos a un nivel superior de información.
- Las adiciones y alteraciones en uno tienen repercusiones sobre el diseño existente en otras áreas.

Debido a esto, no siempre es posible elaborar un estricto para la fase de diseño de la realización. El enfoque debe planificarse para que coincida con el problema en cuestión, teniendo en cuenta que será necesario realizar más modificaciones. Básicamente, el proceso procederá de lo cualitativo a lo cuantitativo, de lo abstracto a lo concreto y de los diseños toscos a los detallados. Es importante prever controles y, si es necesario, correcciones [34].

2.2.4. Estructura funcional del diseño.

Con la intención de abarcar todo el espacio de diseño mecánico sin repetición, la base funcional utiliza palabras de función y flujo para formar una descripción de subfunción como una función y un flujo (es decir, un formato de verbo-objeto). La generación de un modelo de caja negra, la creación de cadenas de funciones para cada flujo de entrada y la agregación de cadenas de funciones en un modelo funcional son la secuencia de pasos que conducen a la formación repetible de un modelo funcional en su enfoque [35].

El modelo de caja negra se construye en base a la función general del producto e incluye los diversos flujos de energía, materiales y señales involucrados en el funcionamiento global del producto. Luego, el modelo funcional detallado se deriva de las subfunciones que operan en los flujos enumerados en el modelo de caja negra [35].

Mediante esta técnica se pueden generar modelos funcionales para cualquier producto. La repetibilidad, la facilidad para almacenar y compartir información de diseño y un mayor alcance en la búsqueda de soluciones son algunas de las ventajas de estos funcionales. Los modelos funcionales revelan dependencias funcionales y de flujo y se utilizan para capturar el conocimiento de diseño de productos existentes para su inclusión en el repositorio de diseño basado en la web. Las representaciones funcionales también aumentan la claridad del problema de diseño y el seguimiento de los flujos de entrada y salida [35].

2.2.5. Matriz QFD.

La implementación de funciones de calidad (QFD) es un enfoque estructurado para definir las necesidades o requisitos del cliente y traducirlos en planes específicos para producir productos que satisfagan esas necesidades. La "voz del cliente" es el término para describir estas necesidades o requisitos declarados y no declarados del cliente. La voz del cliente se captura en una variedad de formas: discusión directa o entrevistas, encuestas, grupos focales, especificaciones del cliente, observación, datos de garantía, informes de campo, etc. [36].

Esta comprensión de las necesidades del cliente se resume luego en una matriz de planificación de productos o “casa de calidad”. Estas matrices se utilizan para traducir "qué" o necesidades de nivel superior en "cómo" de nivel inferior: requisitos del producto o características técnicas para satisfacer estas necesidades [36].

2.2.5.1. Flujo de la metodología QFD.

La metodología básica de implementación de la función de calidad involucra cuatro fases básicas que ocurren en el transcurso del proceso de desarrollo del producto. Durante cada fase, se preparan una o más matrices para ayudar a planificar y comunicar información crítica de diseño y planificación de procesos y productos. Este flujo de metodología QFD se representa a continuación [36].

2.2.5.2. Proceso QFD.

La implementación de la función de calidad comienza con la planificación del producto; continúa con el diseño de productos y procesos; y termina con control de procesos, control de calidad, pruebas, mantenimiento de equipos y capacitación. Como resultado, este proceso requiere múltiples disciplinas funcionales para abordar adecuadamente esta gama de actividades [36].

QFD es sinérgico con los equipos de desarrollo de productos multifuncionales. Puede proporcionar un proceso estructurado para que estos equipos comiencen a comunicarse, tomar decisiones y planificar el producto. Es una metodología útil, junto con los equipos de desarrollo de productos, para respaldar una ingeniería concurrente o un enfoque de desarrollo de productos integrado [36].

La implementación de la función de calidad, por su estructura y enfoque de planificación, requiere que se dedique más tiempo al principio del proceso de desarrollo, asegurándose de que el equipo determine, comprenda y esté de acuerdo con lo que se debe hacer antes de sumergirse en las actividades de diseño. Como resultado, se dedicará menos tiempo a las fases posteriores debido a diferencias de opinión sobre problemas de diseño o rediseño porque el producto no estaba en el objetivo. Conduce a decisiones consensuadas, un mayor compromiso con el esfuerzo de desarrollo, una mejor coordinación y una reducción del tiempo en el transcurso del esfuerzo de desarrollo [36].

CAPÍTULO III

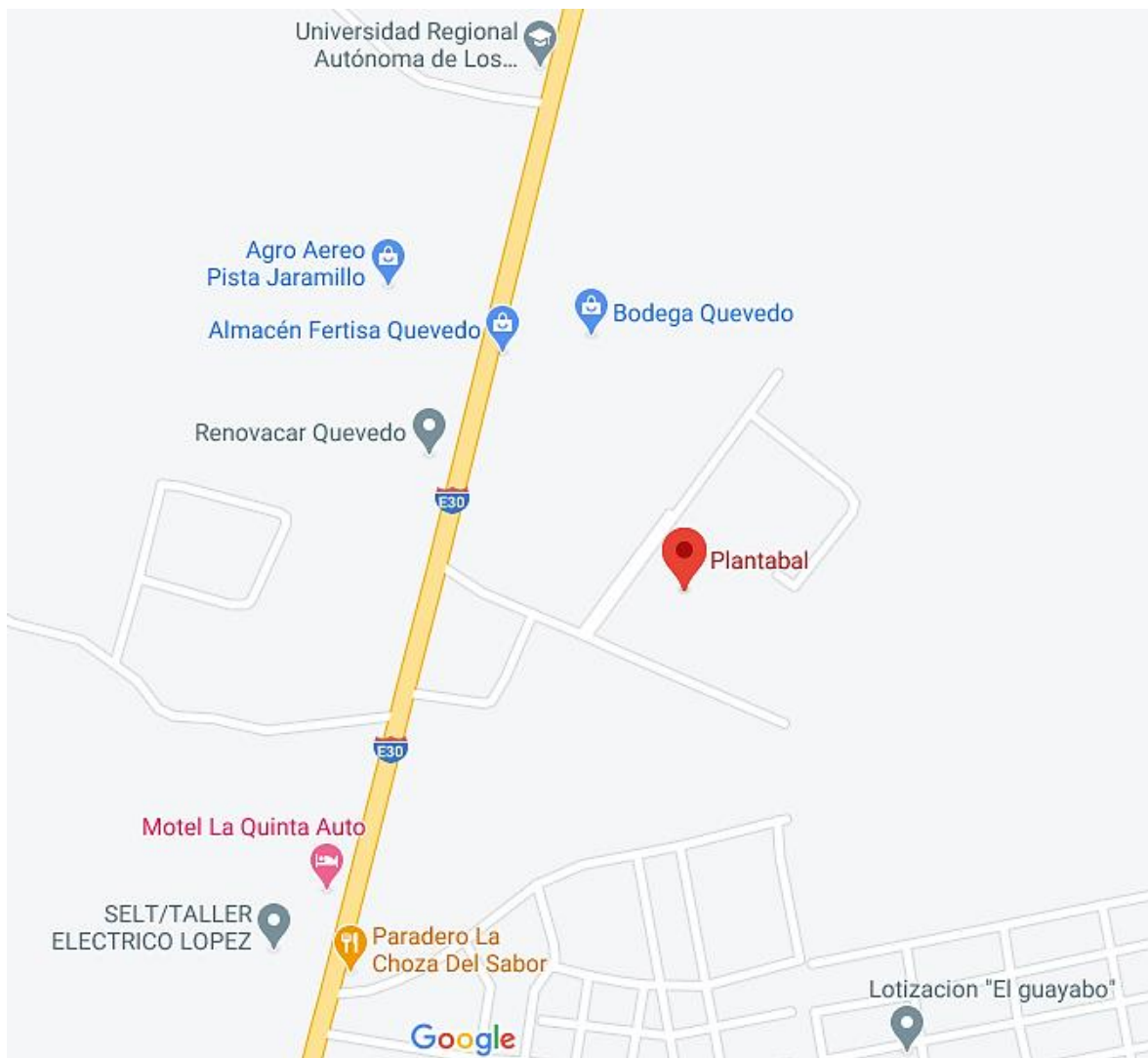
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Localización.

La presente investigación se desarrolla en la empresa Plantaciones de Balsa Plantabal S.A., una industria forestal pionera en el establecimiento, manejo, aprovechamiento e industrialización de madera de balsa (*Ochroma pyramidale*, sinónimo *O. lagopus*) y pachaco (*Schizolobium parahyba*). Se encuentra ubicada en Luis Alberto "Potolo", km 4.5 vía a Valencia, en la ciudad de Quevedo, provincia de Los Ríos.

Cuenta con Sistemas de Certificación ISO 9001:2015 y FSC® (Manejo Forestal y Cadena de Custodia), que garantiza que la gestión forestal e industrial es realizada bajo esquemas de manejo y abastecimiento ambientalmente amigable y con enfoque socialmente responsable.

Figura 4. Ubicación geográfica de la empresa PLANTABAL S.A.



FUENTE: GOOGLE MAPS.

Figura 5. Ubicación física de la empresa PLANTABAL S.A.



FUENTE: GOOGLE MAPS.

3.2. Tipo de investigación.

3.2.1. Investigación experimental.

El objetivo de aplicar este tipo de investigación en el proyecto será para dar a conocer los diferentes conceptos que rigen la metodología del objeto de estudio a través del desarrollo y la manipulación de las variables, la observación, medición, análisis e interpretación de los resultados obtenidos mediante la simulación por el método de volúmenes finitos.

3.2.2. Investigación de campo.

Con la finalidad de resolver la problemática en estudio se aplicará este tipo de investigación para observar, indagar, descubrir, analizar y discutir los parámetros usados en el secado convencional de la madera de balsa; y además para dar a conocer las soluciones que se podrían generar para reducir la contaminación que provoca este tipo de secado rudimentario al medio ambiente.

3.2.3. Investigación bibliográfica.

En este estudio, se usará este tipo de investigación para desarrollar el marco conceptual y referencial mediante la búsqueda exhaustiva en libros, artículos científicos, páginas web y

tesis relacionadas con el tema, con la finalidad de indicar el conjunto de principios teóricos que guían o sustentan la investigación.

3.3. Métodos de investigación.

3.3.1. Método descriptivo.

Este método se encargará de detallar el objeto de estudio mediante el desarrollo de los objetivos específicos en el proceso de investigación conceptual y referencial, logrando determinar los principales conceptos que se necesitarán para la solución de la problemática y como consecuencia obtener los resultados esperados.

3.3.2. Método experimental.

Mediante el método experimental se analizará el proceso del diseño de la cámara de secado híbrida propuesta en esta investigación, y posteriormente, evaluar el funcionamiento de la cámara de secado mediante la simulación por el método de volúmenes finitos (FVM) en el software ANSYS Discovery Live.

3.3.3. Método deductivo.

Considerando el inciso anterior, el método deductivo se encargará de deducir y concretar los resultados obtenidos en la evaluación de la cámara de secado híbrida, con la finalidad de determinar si el problema de investigación ha sido solucionado en gran parte.

Los tipos de investigaciones a usar en el desarrollo del proyecto serán la investigación de campo, bibliográfica y principalmente la experimental, ya que permitirá resolver las variables de estudio mediante el control y manipulación en la experimentación. Además, los métodos a aplicar en la investigación serán el descriptivo, experimental y deductivo.

3.4. Fuentes de recopilación de información.

- **Fuentes primarias:** En esta investigación se recopilará información mediante la observación directa de las cámaras de secado convencionales existentes en el medio y sus parámetros de trabajo, específicamente en la empresa en estudio.
- **Fuentes secundarias:** Las fuentes secundarias que se utilizaran en la investigación son los libros, artículos científicos, tesis relacionadas con el tema y sitios web, extrayendo información relevante que ayude con el proceso de investigación y solución del problema.

3.5. Diseño de la investigación.

La metodología de diseño que se considera en esta investigación se basa en la resolución de problemas experimentales que hacen énfasis a dar soluciones de diseño en la ingeniería. El modelo a seguir en el proceso de diseño se basa en cuatro etapas o niveles, mediante los cuales será posible determinar los resultados requeridos basándose en ciertas actividades relacionadas que integran a estudios de desarrollo:

- Definición del diseño.
- Diseño conceptual.
- Diseño de materialización.
- Diseño de detalle.

Cada etapa de diseño se desarrolla de forma continua y análoga, desplegando alternativas de solución y evaluación de los parámetros que más tienen influencia en el diseño de la cámara de secado híbrida para madera de balsa.

3.6. Tratamiento de los datos.

Para los tratamientos de los datos se utilizaron los siguientes softwares:

- Microsoft Excel 2013.
- Autodesk Inventor 2021 versión estudiantil.
- ANSYS Discovery Live 2020 R1 versión estudiantil.
- ANSYS Spaceclaim 2021 versión estudiantil.

3.7. Recursos humanos y materiales.

3.7.1. Insumos, equipos y otros

- Hojas de papel bond A4.
- Lapiceros.
- Equipos computacionales (laptop).
- Internet.
- Libros.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Proceso de diseño de la cámara híbrida de secado para madera de balsa.

En la presente investigación se trata de diseñar una cámara de secado que contribuya al aprovechamiento de la radiación solar (una fuente inagotable de energía calorífica) para el secado de la madera de balsa. Como bien se conoce, los hornos convencionales de secado utilizan como suministro de calor la combustión de biomasa para elevar la temperatura del aire que circula en el interior de la cámara, como consecuencia expulsan emisiones contaminantes que se suelen neutralizar en el proceso de la fotosíntesis de las plantas, en el caso del CO₂. Además, la combustión de biomasa residual también emite otros gases de efecto invernadero como el óxido nitroso, dióxido de azufre, compuestos orgánicos volátiles, emisiones orgánicas y emisiones de polvo, los cuales contribuyen en menor medida al calentamiento global del planeta. Es notable mencionar que con la reducción de la combustión de biomasa se prolonga las horas de mantenimiento del caldero.

Por otra parte, en esta investigación se va a realizar un análisis fluidodinámico en el software Ansys Discovery Live para verificar y garantizar que el diseño de la cámara de secado híbrida presente una adecuada distribución del flujo de aire caliente en su interior sobre las pilas de madera.

En esta investigación, se pretende enfatizar el diseño en el sistema de aprovechamiento solar (colector) y tratar de mantener uniformemente el flujo de aire y perfiles de temperatura en el interior de la cámara de secado con las especificaciones requeridas. Es por esta razón, que el diseño de la cámara de secado híbrida para madera de balsa se centra en el modelo de etapas del proceso de diseño de la ingeniería concurrente.

Carles Riba [37] indica que el modelo de etapas del proceso de diseño comprende tan solo el diseño del producto y establece las etapas del problema a resolver y la secuencia más recomendable para resolverla. Fundamentalmente se establecen las etapas de especificación, diseño conceptual, diseño de materialización y diseño de detalle. Esta aproximación la adoptan, entre otros, Pahl & Beitz, French y la norma de los ingenieros alemanes VDI 2221.

El modelo a seguir en el proceso de diseño se basa en cuatro etapas o niveles, mediante los cuales será posible determinar los resultados requeridos basándose en ciertas actividades relacionadas que integran a ciertos estudios de desarrollo:

- Definición del diseño.
- Diseño conceptual.
- Diseño de materialización.
- Diseño de detalle.

4.2. Definición del diseño (criterios de diseño).

La calidad en el proceso de diseño es un nuevo concepto metodológico introducido en la ingeniería concurrente permitiendo incorporar en la etapa de diseño requerimientos para verificar que las especificaciones y necesidades del usuario aseguren su satisfacción en cuestiones de calidad.

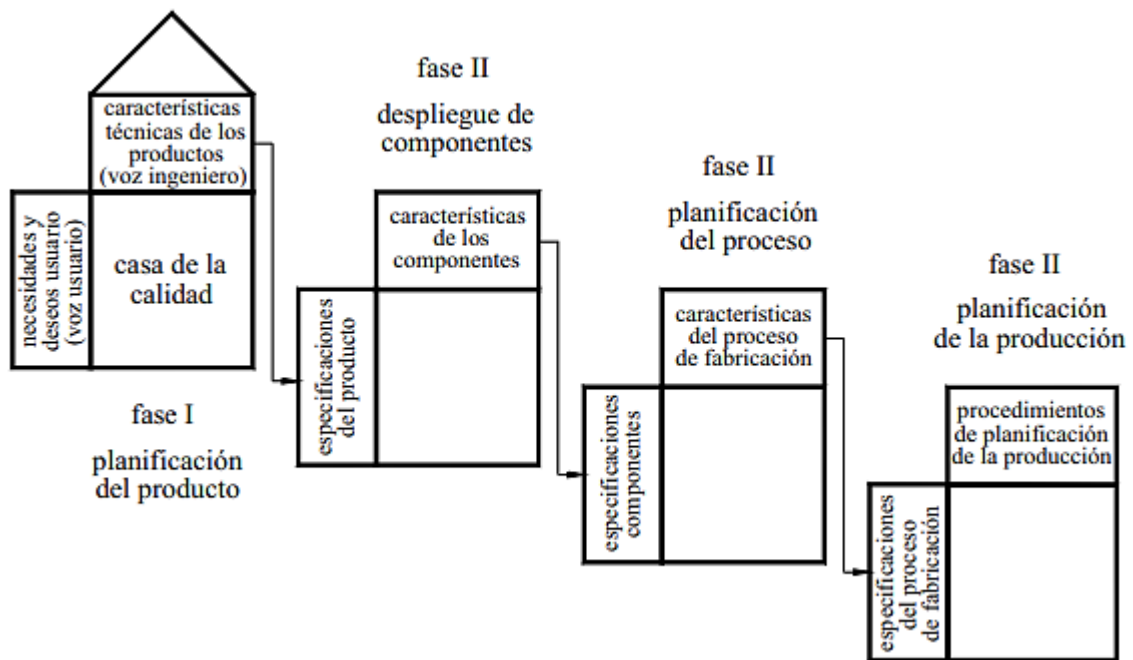
La definición del producto se establece a través de la especificación que constituye la guía y referencia para el diseño y desarrollo. Uno de los métodos que han demostrado mayor eficacia en esta actividad es el desarrollo de la función de calidad, QFD (quality function deployment).

La matriz QFD es una herramienta técnica que permite seleccionar las características de ingeniería o requerimientos técnicos de ingeniería que más tienen incidencia sobre la elaboración del diseño del equipo. Los requerimientos técnicos de ingeniería, formulados por el ingeniero, guardan relación con los requerimientos y deseos del usuario especificados mediante un conjunto de ideas del cliente.

Carles Riba [37], en su libro de diseño concurrente, toma como referencia las 4 fases que planteó Yoji Akao mediante una serie de matrices para guiar el proceso del desarrollo de la función de calidad. Cada fase del desarrollo de un producto (planificación del producto, despliegue de componentes, planificación del proceso y planificación de la producción) se representa por una matriz cuyas características de diseño aportan las especificaciones de entrada a la matriz siguiente, en una secuencia en forma de una cascada de cuatro saltos.

La fase I de la función de calidad, denominada planificación del producto o casa de la calidad (ver figura 6), es la aplicación usada con mayor frecuencia en el diseño, en la cual traduce las necesidades del cliente en atributos técnicos medibles. La casa de la calidad (HOQ) consta de dos partes principales en la matriz: en la parte izquierda contiene los requerimientos, necesidades y deseos del usuario, y en la parte superior se muestran los requerimientos técnicos del ingeniero. Las demás fases o matrices no se aplicarán para la elaboración del diseño de esta investigación.

Figura 6. Esquema de las fases del desarrollo de la función de calidad (QFD)



FUENTE: CARLES RIBA.

4.2.1. Especificaciones de diseño (especificaciones del usuario).

En este apartado se trata de detallar las necesidades del usuario que deben satisfacerse en el transcurso de la investigación para elaborar el diseño de la cámara de secado para madera de balsa, entre los cuales se debe determinar si una especificación es un requerimiento (R, o especificación necesaria) o deseo (D, o especificación conveniente).

Según Carles Riba [37] un requerimiento es toda especificación sin la cual un equipo pierde su objetivo, y deseo es toda especificación que, sin ser estrictamente necesaria para el objetivo del equipo, mejoraría determinados aspectos. Entre otras palabras, un requerimiento es una exigencia que debe ser incluida en el diseño de forma obligatoria y se trata de cumplirla satisfactoriamente; en cambio, un deseo es una especificación que trata de mejorar de cierta manera el diseño del equipo sin ser estrictamente obligatoria.

En la tabla 1 se mencionan las especificaciones del usuario transmitidas en un conjunto de ideas al azar detallados con el grado de importancia (I) que se especifican entre el 1 al 5, donde 5 es el índice de mayor importancia y 1 el de menor importancia. En la tabla se indica en el lado izquierdo los requerimientos para el diseño de la cámara de secado y en el lado derecho las aspiraciones (deseos) que se esperan lograr en el transcurso del proceso.

Tabla 1. Especificaciones del usuario.

N°	REQUERIMIENTOS (R)	I	N°	DESEOS (D)	I
1	Bajo contenido de humedad de la madera <10%	5	9	Bajo costo del material aislante	2
2	Rápido secado de la madera entre 4 a 10 días	5	10	Fácil construcción	2
3	Aprovechar la energía solar	4			
4	Mantener el secado durante el día y la noche	4			
5	Fácil manejo	3			
6	Flujo interno uniforme del aire	5			
7	Capacidad para secar madera de 30k a 35k pies tabla	5			
8	Evitar pérdidas de calor	3			

FUENTE: PINCAY DE LA ROSA JAIR RONALDO.

ELABORADO: PINCAY DE LA ROSA JAIR RONALDO.

4.2.2. Requerimientos técnicos de ingeniería (características técnicas de ingeniería).

Una adecuada elaboración de la casa de la calidad de la matriz QFD requiere de las características técnicas de ingeniería que constituyen la voz del ingeniero y son formuladas por él, mediante el cual las demandas subjetivas o necesidades del usuario se transforman en características técnicas objetivas que llevarán a un adecuado proceso de diseño y desarrollo del equipo.

Las características técnicas de ingeniería se presentan como parámetros constitutivos a seguir a manera de un proceso, sirviendo como referencia para la elaboración del diseño del equipo, donde todos sus aspectos se deben focalizar en resolver las características de mayor importancia seleccionadas en la matriz de calidad.

En la tabla 2, se enlistan los requerimientos técnicos de ingeniería (medibles) orientados a cumplir con las necesidades del usuario, y como mínimo se debe identificar una característica técnica para cada especificación del usuario:

Tabla 2. Requerimientos técnicos de ingeniería.

N°	Características técnicas	Unidades de medida
1	Elección del programa de secado	n/a
2	Colector solar	n/a
3	Caldera de vapor	n/a
4	Control automático de componentes	n/a
5	Velocidad de ventiladores	m/s
6	Forma interna del secador	n/a
7	Dimensiones del secador	m
8	Baja conductividad térmica del material aislante	W/m °C
9	Bajo número de componentes	n/a

FUENTE: PINCAY DE LA ROSA JAIR RONALDO.

ELABORADO: PINCAY DE LA ROSA JAIR RONALDO.

4.2.3. Elaboración de la matriz QFD.

La fase I de la matriz QFD denomina casa de la calidad, se construye a partir de las especificaciones de usuario elaboradas en la tabla 1 (las cuales se incluyen en la parte horizontal de la matriz) y de los requerimientos técnicos de ingeniería presentadas en la tabla 2 (se colocan en la parte vertical de la matriz).

Para la construcción de la matriz de calidad se usa una plantilla elaborada en Microsoft Excel con aspecto tradicional de la casa de calidad, con la finalidad de facilitar los cálculos del proceso de relación y correlación de variables.

En la figura 7 se observa el ingreso de datos, donde cada una de las especificaciones del usuario se enmarca por el grado de importancia en una escala del 1 al 5, donde 5 equivale al mayor peso y disminuye conforme llega a 1; es decir que mientras más alto es el valor mayor es el grado de importancia de dicha especificación de diseño. La dirección de mejora de los requerimientos técnicos de ingeniería indica si es mejor con mayor o menor cantidad de dicha característica, o si se espera que el propósito sea alcanzar el objetivo.

Figura 7. Ingreso de datos en la casa de calidad de la matriz QFD.

Fila #	Valor máximo de relación en fila	Importancia relativa	Importancia (1 al 5)	Especificaciones del usuario	Columa #														
					1	2	3	4	5	6	7	8	9						
				Requerimientos técnicos de ingeniería															
					Elección del programa de secado	X	X	X	X	▼	▲	X	▼	▼					
					Colector solar														
					Caldera de vapor														
					Control automático de componentes														
					Velocidad de ventiladores														
					Forma interna del secador														
					Dimensiones del secador														
					Baja conductividad térmica del material aislante														
					Bajo número de componentes														
1		13,2	5	Bajo contenido de humedad de la madera <10%															
2		13,2	5	Rápido secado de la madera entre 4 a 10 días															
3		10,5	4	Aprovechar la energía solar															
4		10,5	4	Mantener el secado durante el día y la noche															
5		7,9	3	Fácil manejo															
6		13,2	5	Flujo interno uniforme del aire															
7		13,2	5	Capacidad para secar madera de 30k a 35k pies tablas															
8		7,9	3	Evitar pérdidas de calor															
9		5,3	2	Bajo costo del material aislante															
10		5,3	2	Fácil construcción															

FUENTE: PINCAY DE LA ROSA JAIR RONALDO.

El siguiente paso es llenar el cuerpo de la matriz con diferentes niveles de ponderación según sea conveniente, estableciendo tres tipos de relación: fuerte, moderada y débil (identificados por un círculo con un guion medio, un círculo y un triángulo, respectivamente, y si no existe relación entre una variable y otra se deja un espacio en blanco). Este sistema de correlación entre filas y columnas indica las capacidades de cada característica técnica de ingeniería para lograr satisfacer las necesidades del usuario.

En la figura 8 se muestran los símbolos cualitativos para llenar la matriz de relaciones indicando para cada uno su respectivo significado, donde el círculo con guion medio equivale a 9, el círculo a 3, el triángulo a 1 y el espacio en blanco a 0, si se refiere a términos cuantitativos.

Figura 8. Simbología cualitativa de ponderación.

⊖	Relación fuerte	9
○	Relación moderada	3
▲	Relación débil	1

FUENTE: PINCAY DE LA ROSA JAIR RONALDO.

Figura 9. Correlaciones técnicas del cuerpo de la matriz QFD

Fila #	Valor máximo de relación en fila	Importancia relativa	Importancia (1 al 5)	Especificaciones del usuario	Columa #									
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	
					Requerimientos técnicos de ingeniería Elección del programa de secado Colector solar Caldera de vapor Control automático de componentes Velocidad de ventiladores Forma interna del secador Dimensiones del secador Baja conductividad térmica del material aislante Bajo número de componentes									
					Dirección de mejora: Mínimo (▼), Máximo (▲), u Objetivo (x)									
1	9	13,2	5	Bajo contenido de humedad de la madera <10%	⊖	○	○	○	○	○				
2	9	13,2	5	Rápido secado de la madera entre 4 a 10 días	⊖	⊖	⊖	○	⊖	⊖	○	○		
3	9	10,5	4	Aprovechar la energía solar		⊖				○	○			▲
4	9	10,5	4	Mantener el secado durante el día y la noche		⊖	⊖			○	○			▲
5	9	7,9	3	Fácil manejo				⊖						
6	9	13,2	5	Flujo interno uniforme del aire					⊖	⊖	⊖			
7	9	13,2	5	Capacidad para secar madera de 30k a 35k pies tablas		○	○			▲	⊖			
8	9	7,9	3	Evitar pérdidas de calor								⊖		
9	9	5,3	2	Bajo costo del material aislante								⊖		
10	9	5,3	2	Fácil construcción										⊖

FUENTE: PINCAY DE LA ROSA JAIR RONALDO.

Al llenar el cuerpo de la matriz con la simbología correspondiente, considerando los criterios de ingeniería para generar la correcta evaluación del diseño, se puede apreciar que todos los requerimientos técnicos formulados si muestran una fuerte relación con las especificaciones de usuario, tratando de cumplir con al menos una característica técnica para cada demanda (ver figura 9).

Una vez transcurrida la etapa de correlaciones que completó satisfactoriamente el cuerpo de la matriz, se procede a la evaluación técnica, la cual consiste en la valoración de la incidencia de cada uno de los requerimientos técnicos de ingeniería en las necesidades del usuario.

En términos de evaluación técnica, Carles Riba [37] en su libro de diseño concurrente expresa: “Normalmente, se señalan unas pocas características técnicas de ingeniería para ser mejoradas, en función del valor de la importancia y de la posición en la evaluación técnica”.

Figura 10. Evaluación técnica de la matriz QFD.

Columna #	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Dirección de mejora: Mínimo (▼), Máximo (▲), u Objetivo (X)	X	X	X	X	▼	▲	X	▼	▼
Requerimientos técnicos de ingeniería	Elección del programa de secado	Colector solar	Caldera de vapor	Control automático de componentes	Velocidad de ventiladores	Forma interna del secador	Dimensiones del secador	Baja conductividad térmica del material aislante	Bajo número de componentes
Especificaciones del usuario									
Valor límite u objetivo									
Dificultad técnica (0=Fácil de lograr, 10=Extremadamente difícil)									
Valor máximo de relación en columna	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Importancia	236,8	386,8	292,1	150,0	276,3	352,6	339,5	157,9	68,4
Importancia relativa	10,5	17,1	12,9	6,6	12,2	15,6	15,0	7,0	3,0

FUENTE: PINCAY DE LA ROSA JAIR RONALDO.

La importancia relativa o importancia porcentual mostrada en la figura 10, indica el grado de incidencia que tiene un determinado requerimiento técnico de ingeniería respecto a la satisfacción de las demandas del usuario, y se puede observar que tres características no tienen importancia directa de ser analizadas, las cuales son:

- Control automático de componentes (4).
- Baja conductividad térmica del material aislante (8).
- Bajo número de componentes (9).

Los requerimientos técnicos restantes presentan el 83,4% de incidencia e indican que se deben concentrar todos los esfuerzos sobre ellos para garantizar la mejora del diseño y lograr cumplir con las necesidades propuestas. A continuación, se especifican las seis características técnicas que se evaluarán en las siguientes etapas de diseño, y se muestran clasificados por el grado de importancia y prioridad:

- Colector solar (2).
- Forma interna del secador (6).
- Dimensiones del secador (7).
- Caldera de vapor (3).
- Velocidad de ventiladores (5).
- Elección del programa de secado (1).

Se establece que la caldera de vapor no se toma en consideración como una característica de diseño a evaluar en las siguientes etapas de la investigación, debido a que en la empresa PLANTABAL ya cuentan con un equipo de caldera y se pretende que utilicen el mismo dispositivo para la cámara de secado híbrida.

4.3. Diseño conceptual.

La generación de conceptos es el siguiente paso en el proceso de diseño después de la definición, tiene el propósito de dar solución a los problemas y permite elaborar alternativas de diseño para ser evaluadas. Para la elaboración del diseño conceptual, es recomendable utilizar herramientas metodológicas que simplifican la manera de generar ideas de diseño, a partir de las características técnicas del producto más importantes.

La estructura funcional es una de las herramientas aplicadas al diseño concurrente y se aplica para generar varias alternativas de diseño en esta investigación. Se inicia con una caja negra (black box) en el que se detallan las funciones principales a cumplir, las señales de entrada y de respuesta del sistema. Luego, las funciones principales se dividen en subfunciones y se desglosan en otra caja independiente para realizar un respectivo análisis más detallado del subsistema.

Por lo tanto, se elabora la estructura de la caja negra a partir de la función global de diseño, la cual plantea resolver el objetivo principal de la investigación, relacionando los flujos de ingreso y salida con flechas continuas o discontinuas según sea correspondiente.

Para mejorar la comprensión del flujo de información y la representación de las funciones del diseño de la cámara de secado híbrida para madera de balsa, es necesario que la estructura modular basada en funciones sea representada por una simbología de fácil manejo y buena flexibilidad. Para ello, en esta investigación, es necesario adoptar la simbología propuesta por la norma alemana VDI 2222 y especificada por Carles Riba [37] en su investigación, para elaborar el black box. Los símbolos de referencia se detallan a continuación:

- Una *función* se representa en un **rectángulo con línea continua**.
- La *dirección del flujo de material* se representa con una **flecha de doble línea continua**.
- La *dirección del flujo de energía* se representa con una **flecha de línea continua**.
- La *dirección del flujo de señal* se representa con una **flecha de línea discontinua**.
- Un *sistema, subsistema o módulo* se representa en un **rectángulo con línea de punto y raya**.

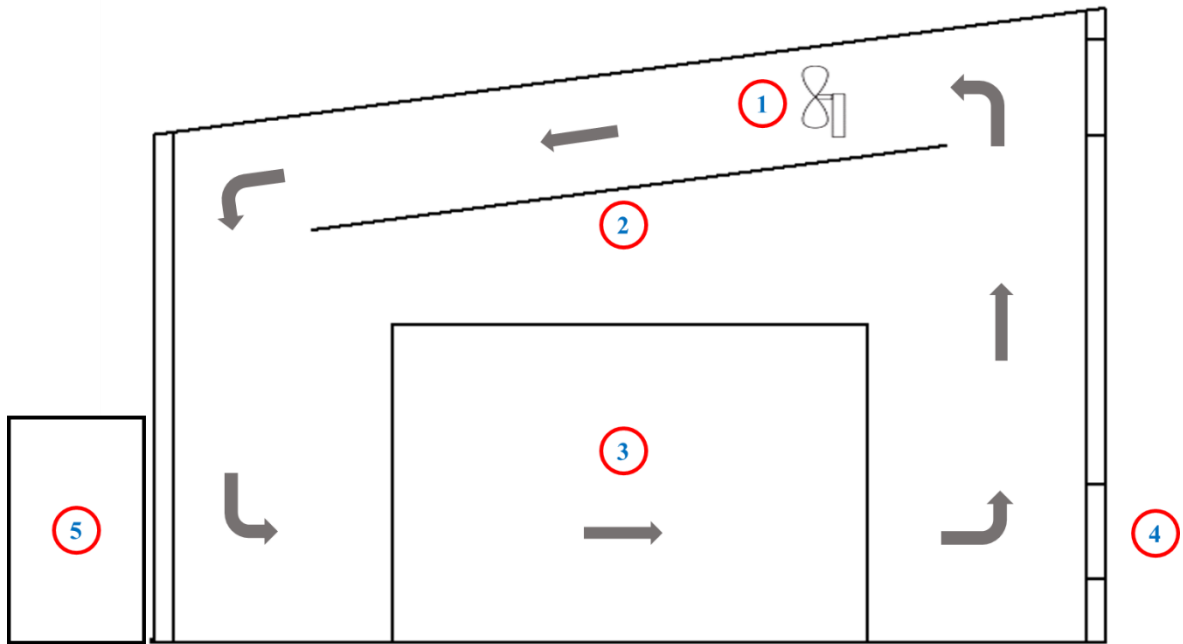
Ecuador es uno de los principales países exportadores de madera de balsa aserrada, en donde las empresas como Plantabal se dedican a trabajar la madera para generar productos de mayor valor agregado. Para ello, es necesario eliminar la humedad de la madera de balsa aserrada en cámaras de secado. La mayoría de las empresas emplean hornos convencionales de secado para extraer la humedad de la madera y reducirla hasta el 10%. En las empresas de la localidad de Quevedo y sus alrededores no existen registros de que usen cámaras de secado solares que aprovechen la radiación solar como fuente de energía inagotable (pero limitada por las horas de aprovechamiento).

Generar el primer concepto con una propuesta de diseño preliminar para satisfacer la extracción del contenido de humedad de la madera aserrada, radica en identificar sus componentes más importantes y entre ellos se destacan: un **colector solar (2)** que capte la energía del sol; una **caldera (5)** para generar vapor; un **sistema de ventilación (1)** para forzar al aire a circular en el interior de la cámara sobre la **pila de madera (3)**; sensores de temperatura, humedad relativa y variador de frecuencia para monitorear en todo instante de tiempo el proceso de secado; y **ventilas (4)** para extraer el aire saturado de humedad (ver figura 11).

En la figura 11 se muestra el principio de funcionamiento de una cámara de secado híbrida, el cual consiste en captar la radiación solar mediante un colector y transformarla en energía térmica, con ello se eleva la temperatura del aire interno; los ventiladores se accionan para

mover la masa de aire caliente y ponerla en circulación hacia la pila de madera para extraer su humedad. El aire caliente se hace circular una y otra vez sobre la madera hasta que la humedad relativa llegue a su punto de equilibrio y el aire ya no pueda absorber más humedad de la madera.

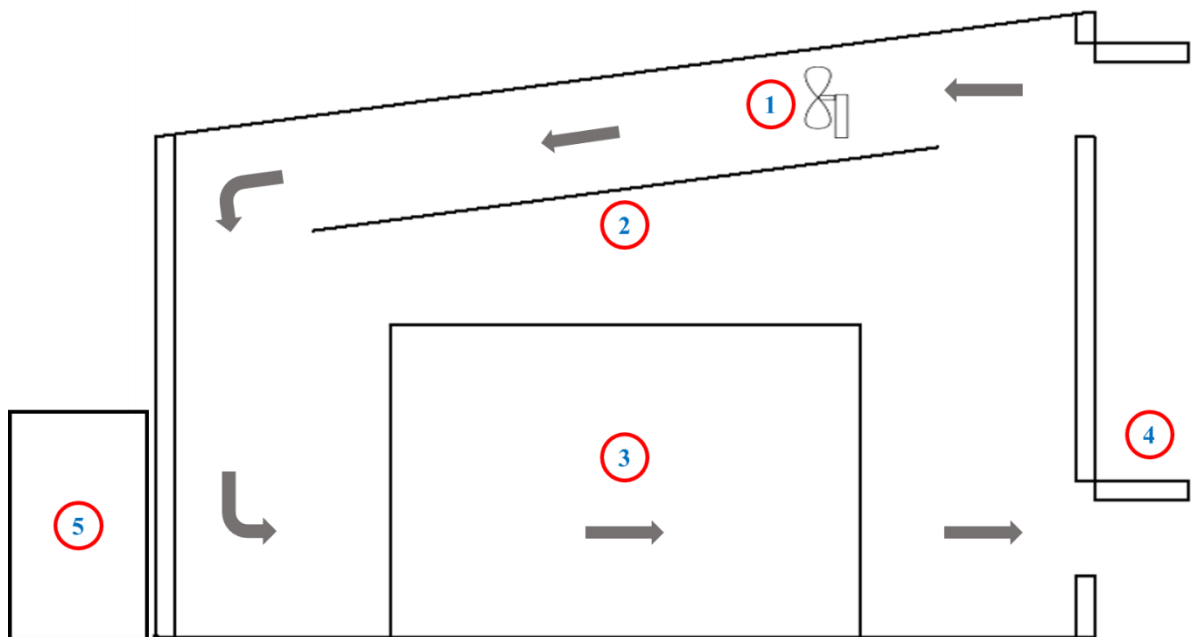
Figura 11. Esquema de recirculación de aire caliente en el interior de la cámara de secado para madera de balsa.



FUENTE: PINCAY DE LA ROSA JAIR RONALDO.

Debido a la transferencia de calor y masa que sucede entre el aire caliente y la madera se produce un fenómeno denominado saturación de aire. El aire saturado contiene una cantidad máxima de vapor de agua transferida por la madera, y este es el motivo por el cual no podrá absorber más humedad. Por lo tanto, este aire saturado humedad (vapor de agua) se expulsa al exterior de la cámara mediante la abertura de las ventoleras y, en el mismo instante, se deja ingresar aire fresco del ambiente (ver figura 12).

Figura 12. Esquema de circulación de aire caliente cuando el aire se encuentra saturado de humedad.



FUENTE: PINCAY DE LA ROSA JAIR RONALDO.

4.3.1. Función principal y estructura funcional para el diseño de la cámara de secado para madera de balsa.

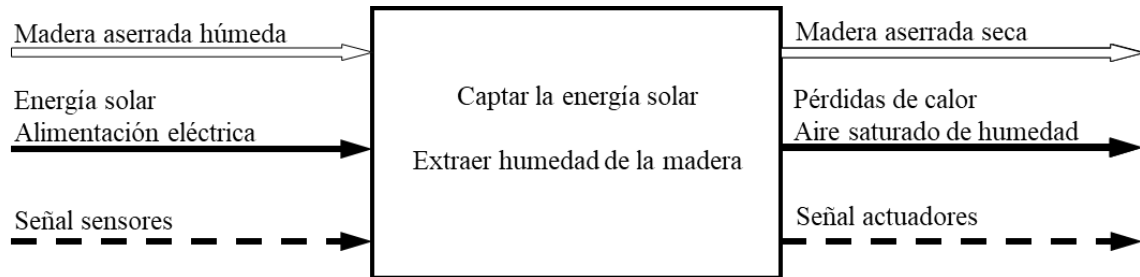
Algunas de las principales funciones que debe satisfacer el diseño de la cámara de secado se describen a continuación:

- Captar la energía solar.
- Elevar la temperatura del aire interno.
- Circular el aire caliente a través de la pila de madera.
- Extraer la humedad de la madera.
- Mantener el funcionamiento continuo de la cámara de secado.
- Expulsar el aire saturado.
- Ingresar aire fresco del ambiente.
- Humedecer la madera.
- Controlar automáticamente el proceso de secado.

El análisis funcional es posible representarlo por un flujo de información en forma de caja, donde contiene todas las funciones principales de diseño y estas se desglosan en

subfunciones adyacentes para el respectivo análisis. La función principal para el diseño de una cámara de secado para madera de balsa se puede representar mediante el siguiente diagrama funcional:

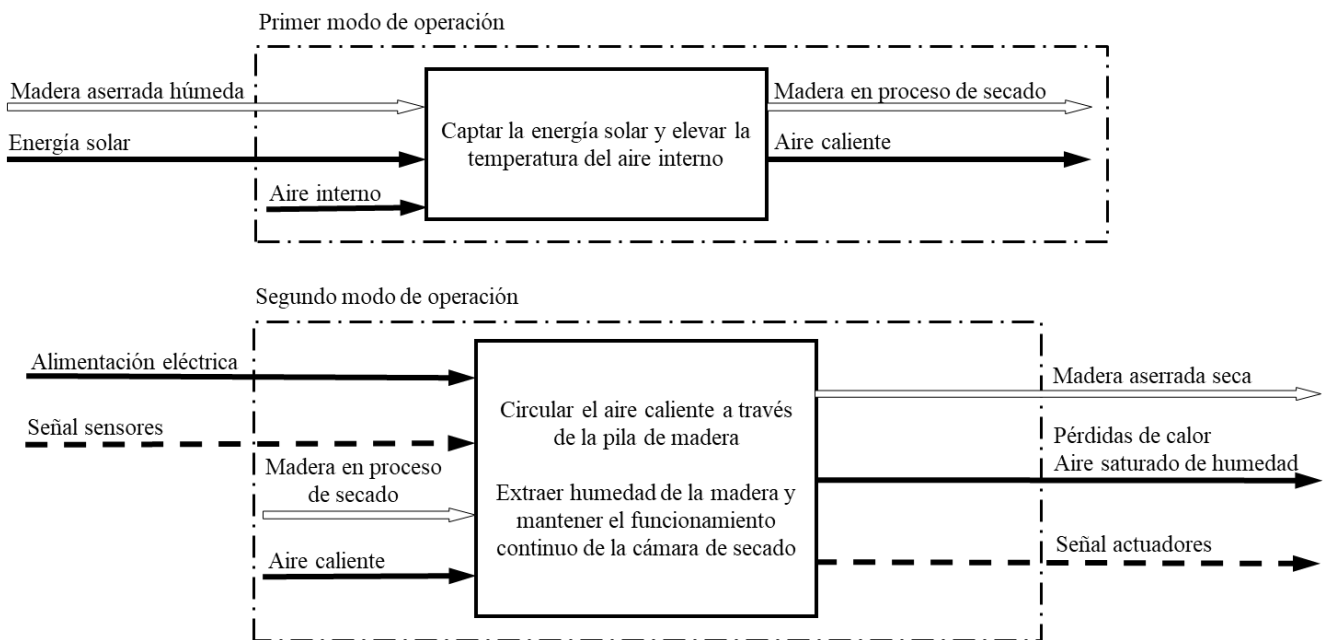
Figura 13. Black box de la función principal.



FUENTE: PINCAY DE LA ROSA JAIR RONALDO.

Siguiendo con el procedimiento de establecer una estructura funcional para el sistema, se puede denotar que en la figura 13 la función principal tiene dos modos de operación principales: 1) la captación de energía solar para transformarla en calor; 2) la transferencia de vapor de agua desde la madera al aire para lograr reducir el contenido de humedad de la madera. La nueva representación de los modos de operación descritos se estructura de la siguiente manera (ver figura 14):

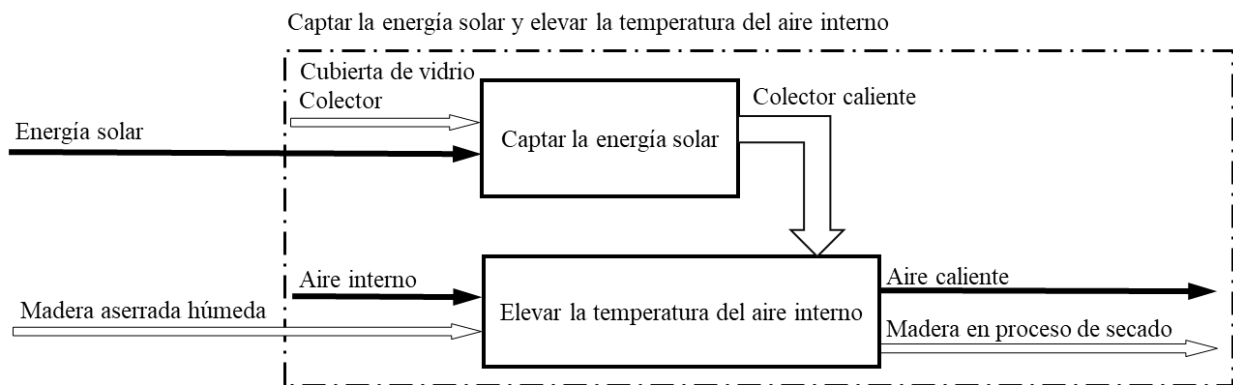
Figura 14. Estructura funcional de los modos de operación para el diseño de la cámara de secado híbrida para madera de balsa.



FUENTE: PINCAY DE LA ROSA JAIR RONALDO.

El primer modo de operación, como se observa en la figura 15, no representa demasiada complejidad para satisfacer las subfunciones. Para ello, la subfunción de captación de energía solar debe garantizar que cuando el colector sea calentado, éste permita elevar la temperatura del aire interno permitiendo que el aire, el cual estaba inicialmente a temperatura ambiente, se caliente a la temperatura de operación. En este proceso la madera aún no ha sufrido ningún cambio de temperatura ni humedad.

Figura 15. Estructura funcional del primer modo de operación.

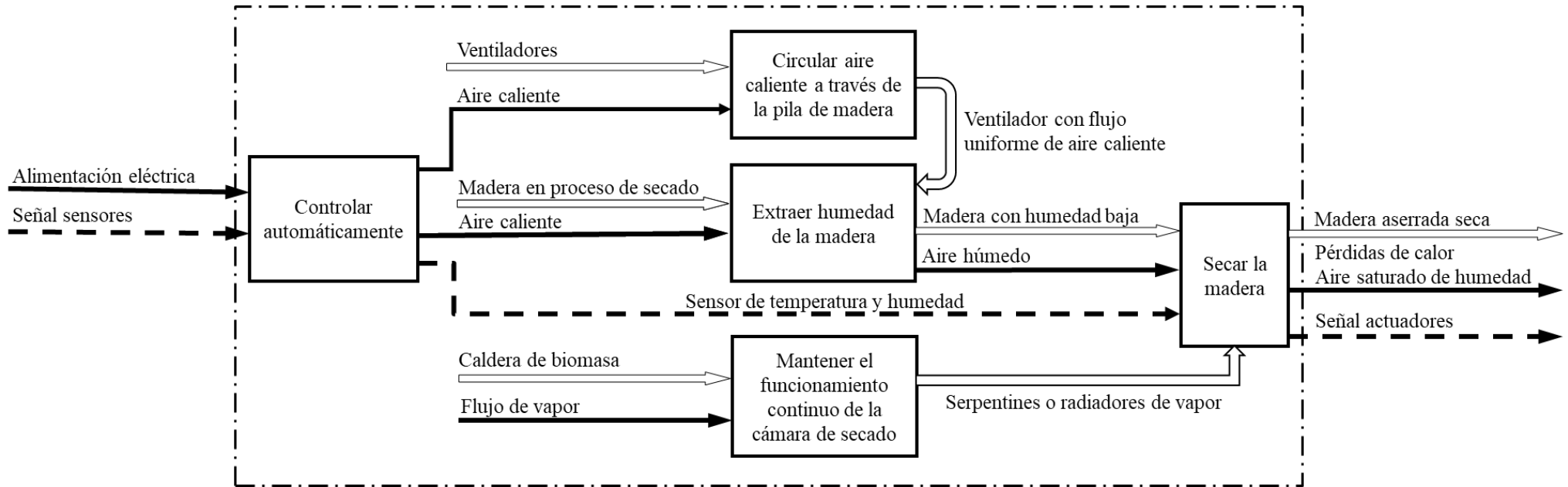


FUENTE: PINCAY DE LA ROSA JAIR RONALDO.

El segundo modo de operación representa un análisis más complejo y de mucho interés ya que en este proceso la madera comienza a eliminar su humedad interna hasta el contenido deseado. En efecto, hay que ejecutar dos subfunciones que trabajan de forma continua: a) Circular aire caliente a través de la pila de madera; b) Extraer humedad de la madera, y para ello, se requiere de un sistema de ventilación con flujo uniforme de aire caliente para que circule por la pila de madera una y otra vez. Este proceso debe estar siendo monitoreado por una función de control automático, y esta función es la que va a coordinar las subfunciones a y b con la subfunción c) Mantener el funcionamiento continuo de la cámara de secado.

Por lo tanto, la función de control recibe las señales de los sensores de temperatura y humedad, y en efecto envía unas señales de respuesta a los actuadores para accionarlos; como es el caso de la electroválvula para el ingreso de vapor de la caldera a los serpentines para equilibrar la temperatura interna de la cámara, y la abertura de las ventilas cuando el aire se encuentre saturado de humedad. Así pues, la nueva representación de la estructura funcional, sin considerar la abertura de las ventoleras, podría tener la configuración de la figura 16.

Figura 16. Estructura funcional del segundo modo de operación.



FUENTE: PINCAY DE LA ROSA JAIR RONALDO.

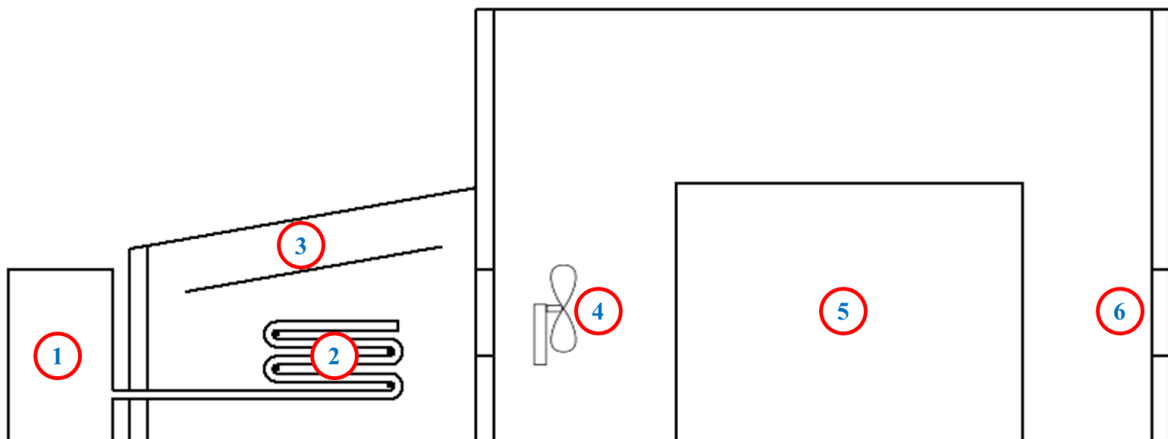
4.3.2. Principios de solución de diseño.

Mediante el análisis efectuado en la sección 4.3.1 respecto a la estructura funcional de la cámara de secado para madera de balsa, considerando las condiciones de diseño y las características técnicas de ingeniería, se procede a generar ideas de diseño y principios de solución, las cuales se describen a continuación:

4.3.2.1. Solución A.

La primera idea de diseño consiste en una cámara de secado para madera con colectores solares ubicados en una cámara externa. El aire es calentado en la cámara secundaria mediante el colector solar y la cubierta de vidrio transparente (3), el cual transforma la radiación solar en energía térmica y, se usa como complemento alternativo, una caldera de biomasa (1) para hacer circular vapor de agua por los serpentines (2). Los serpentines están colocados en el interior de la cámara secundaria debajo del colector solar. Los ventiladores (4), ubicados en la parte inferior cerca de la pila de madera, ingresa el aire caliente y lo hace circular en el interior de la cámara para extraer la humedad de la madera (5). Cuando el aire se satura de humedad se abren las ventilas (6) para expulsarlo al exterior y, por otra parte, se permite el ingreso de aire fresco del ambiente.

Figura 17. Esquema referencial para la solución de diseño A.



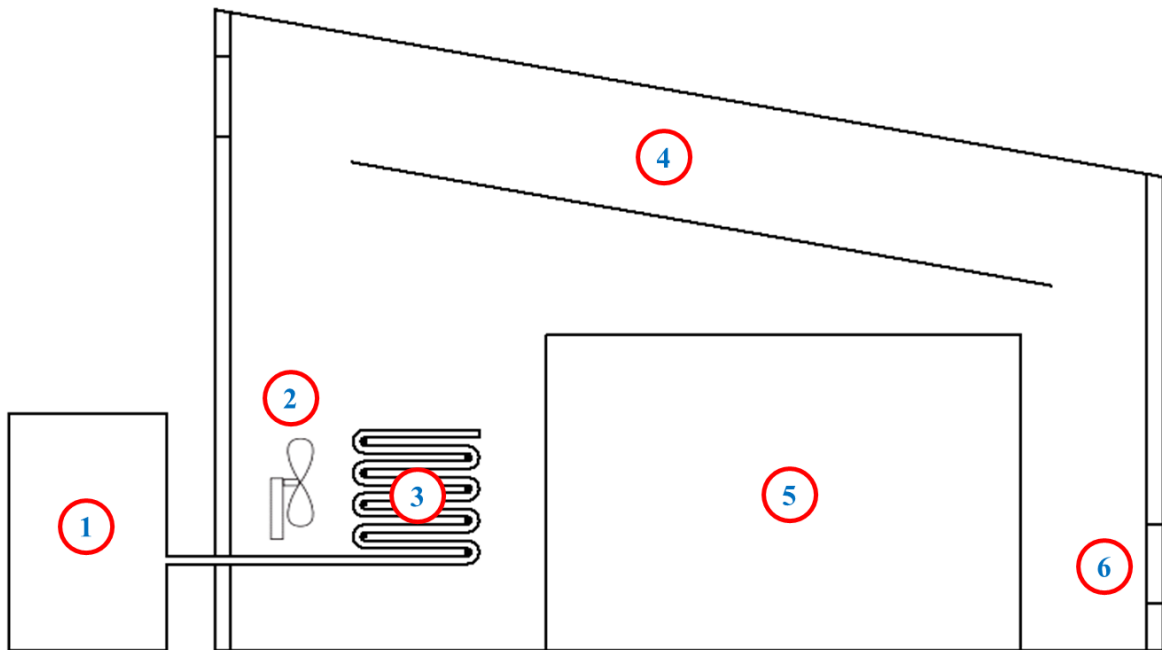
FUENTE: PINCAY DE LA ROSA JAIR RONALDO.

4.3.2.2. Solución B.

La segunda idea de diseño consta de un colector integrado a la cámara de secado, el cual se encuentra ubicado en la parte superior. El techo contiene una cubierta de vidrio transparente y debajo se encuentra el colector solar, ambos con la misma inclinación. La caldera de

biomasa envía vapor saturado hacia los radiadores aleteados (ubicados delante de los ventiladores), los cuales se encuentran en el interior del secador y se encargan de expulsar calor para aumentar la temperatura del aire. Los ventiladores se encuentran posicionados de igual manera que la idea anterior, y hacen circular el aire caliente a través de la pila de madera. Las ventilas se abren para permitir la salida de aire saturado al igual que en el caso anterior e ingresar aire fresco del ambiente.

Figura 18. Esquema referencial para la solución de diseño B.

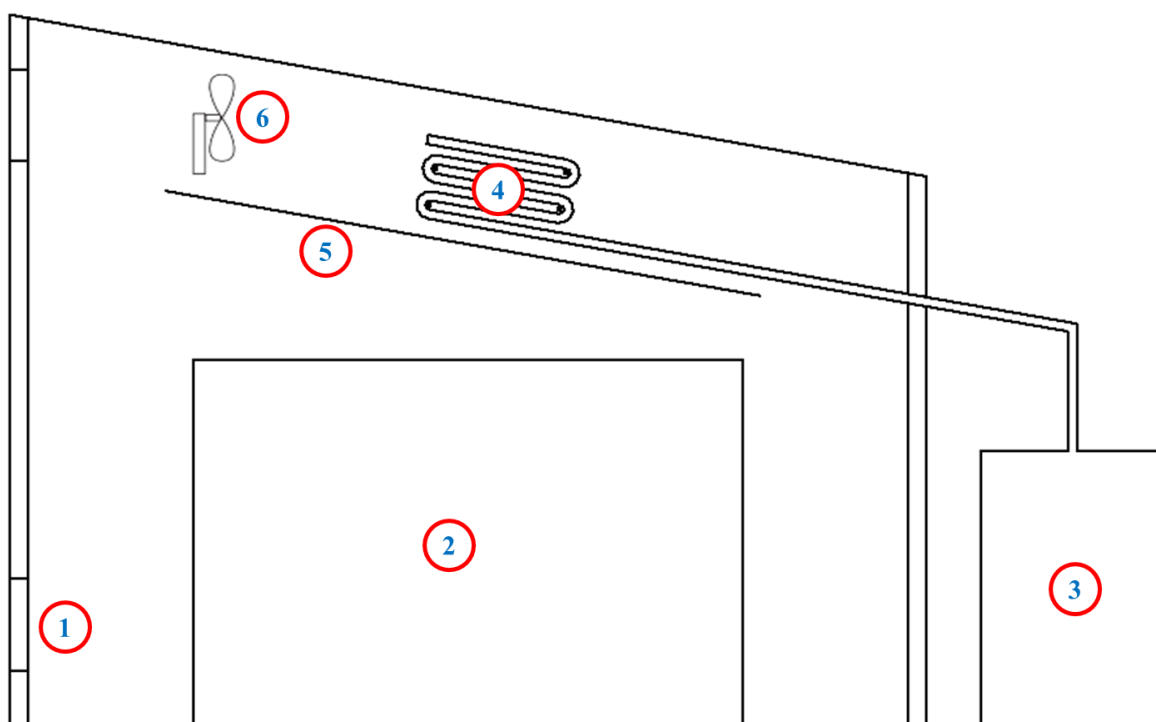


FUENTE: PINCAY DE LA ROSA JAIR RONALDO.

4.3.2.3. Solución C.

La tercera idea de diseño, consiste en una cámara de secado con cubierta de vidrio transparente y debajo se ubica un colector solar (5), de igual forma que en la solución b. La diferencia radica en que los ventiladores (6) se ubican entre el techo y el colector solar, con la finalidad de hacer fluir el aire caliente hacia la pila de madera (2). La caldera de biomasa (3) se usa como unidad de respaldo y envía vapor a los serpentines (4), los cuales se ubican encima del colector y emanan calor para calentar el aire interno. Además, contienen las ventoleras (1) de ingreso de aire fresco y salida de aire saturado, las cuales se abren o se cierran según la señal que reciba el panel de control de los sensores de humedad del aire.

Figura 19. Esquema referencial para la solución de diseño C.



FUENTE: PINCAY DE LA ROSA JAIR RONALDO.

4.3.3. Evaluación de los principios de solución.

El principio de *solución A*, es factible debido a que presenta mayor área de secado ya que la mayoría de los componentes se encuentran en una cámara secundaria, pero no garantiza que el flujo de aire caliente recircule de forma uniforme sobre la pila de madera. En este sistema se puede aislar las paredes y el techo de mejor manera, provocando menores pérdidas de calor al exterior.

Por otra parte, desde el punto de vista de funcionamiento, el principio de *solución B* presenta un colector y radiadores aleteados integrados en la cámara de secado. A diferencia de la solución A, mejora la recirculación de aire sobre la pila de madera. Sin embargo, debido a la ubicación de los ventiladores y radiadores, requiere de más espacio para satisfacer un determinado volumen de madera.

Por último, desde el punto de vista de funcionamiento y dimensiones, la *solución C* mejora la estructuración de las características de diseño para satisfacer los mismos requerimientos, es decir, los componentes internos se organizan para generar mayor espacio entre la pila de madera. Así pues, los ventiladores y los serpentines (sistema de respaldo para calentar el aire) se ubican entre el colector y la cubierta de vidrio. El aire caliente se hace circular desde

la parte superior y fluye continuamente por la pila de madera (recirculación). Las ventilas se ubican en lugares estratégicos para permitir la rápida transferencia de aire fresco y aire saturado. En este diseño se pueden considerar el uso de deflectores para mejorar la fluidez uniforme de aire caliente.

4.4. Diseño de materialización.

En esta etapa del diseño se realizan el análisis y los cálculos respectivos de los diversos componentes que conforman la cámara de secado híbrida para madera de balsa propuesta en la etapa de diseño conceptual. Los componentes que se consideran en esta etapa de materialización son las características técnicas de ingeniería que se seleccionaron en la etapa de definición, mediante la aplicación de la casa de calidad de la matriz QFD. Estas características de ingeniería de detallan a continuación:

- Seleccionar el programa de secado.
- Dimensiones del secador.
- Velocidad de ventiladores.
- Colector solar.
- Forma interna del secador.

Adicionalmente, en esta etapa del diseño de materialización también se considera la evaluación del funcionamiento del diseño propuesto mediante el modelado fluido dinámico en el software ANSYS Discovery Live, para evaluar el comportamiento del flujo de aire en el interior de la cámara de secado.

4.4.1. Seleccionar el programa de secado.

Seleccionar un programa de secado recomendado para eliminar la humedad de la madera de balsa de forma continua, es el paso fundamental para lograr un secado eficiente con el mínimo de defectos posibles.

Según los datos proporcionados por la empresa PLANTABAL, la pila de madera de balsa es ingresada a la cámara de secado con un contenido de humedad inicial del 130% base seca. Posteriormente, al finalizar el proceso de secado, el contenido de humedad de la madera debe ser menor del 10%.

Generalmente, los programas de secado se elaboran mediante una tabla de 8 columnas que indican los pasos que se deben seguir en todo el proceso de eliminación de humedad de la

madera hasta que el contenido de humedad final de la balsa sea menor al 10%. Las primeras dos columnas son opcionales de colocarlas, pero ayudan a manejar la elaboración del programa en las siguientes etapas. A continuación, se describe en orden secuencial el significado de cada columna de la tabla 3:

- La columna 1 indica el número de paso de temperatura (N° Paso Temp.).
- La columna 2 indica el número de paso de depresión psicrométrica (N° Paso Dep.).
- La columna 3 indica el contenido de humedad inicial de la balsa en % (CH).
- La columna 4 indica la temperatura de bulbo seco en °C (TBS).
- La columna 5 indica la depresión psicrométrica (Dep.).
- La columna 6 indica la temperatura del bulbo húmedo en °C (TBH).
- La columna 7 indica el contenido de humedad de equilibrio (CHE).
- La columna 8 indica la humedad relativa en % (HR).

En la fila 5 del anexo 3, se muestra el programa de secado recomendado para la madera de balsa, donde el horario depende del espesor de la especie. Para un espesor de 2 pulgadas, el programa recomendado es el *T8-D3S*.

Tabla 3. Programa de secado recomendado para madera de balsa.

N° Paso Temp.	N° Paso Dep.	CH (%)	TBS (°C)	Dep.	TBH (°C)	CHE	HR (%)
1	1	Mayor a 50	54,5	3	51,5	15,5	84
1	2	50	54,5	4	50,5	13,5	80
1	3	40	54,5	6	48,5	11,5	72
1	4	35	54,5	10,5	44	8,25	54,5
2	5	30	60	19,5	40,5	4,75	31,25
3	6	25	65,5	28	37,5	3	17
4	6	20	71	28	43	3	20
5	6	15	82	28	54	3,5	25

FUENTE: BOLFOR & VISCARRA SILVERIO.

ELABORADO: PINCAY DE LA ROSA JAIR RONALDO.

En los anexos 4 y 5, se encuentran las especificaciones de temperaturas y depresiones psicrométricas para distintas configuraciones de programas de secado para madera. La

estructuración del programa de secado escogido *T8-D3S* se obtiene con los valores de las columnas indicadas en dichas tablas. Los datos de los anexos 2, 3, 4 y 5 se obtuvieron de la investigación realizada por BOLFOR [38] en el proyecto de manejo forestal sostenible. En la tabla 3, se observa la configuración del programa de secado a ser aplicado en el secado de la balsa.

La temperatura de bulbo seco es la temperatura de operación de la cámara de secado, por lo que se requiere de un sistema de generación de calor que permita elevar la temperatura interna del aire. El objetivo de esta investigación es aprovechar la radiación que emite el sol hacia la superficie terrestre, debido a que es una fuente de energía limpia e inagotable. El inconveniente que se presenta son las horas de radiación, las cuales solamente pueden ser captadas durante el día.

4.4.2. Dimensiones del secador.

Las cámaras de secado se diseñan tomando en consideración la capacidad de madera a secar en el proceso. Datos técnicos proporcionados por la empresa PLANTABAL indican que el promedio de madera a secar es de 70 a 82 metros cúbicos (equivalente a un volumen de 30000 a 35000 pies tabla) para una secadora de dimensiones grandes, siendo esta capacidad de secado muy alta. Asimismo, la empresa indica que las cámaras se cargan en su interior con maderas de una sola especie y uno o dos espesores adyacentes.

Wood-Mizer [39], una empresa dedicada a la construcción de secadores solares, publicó un manual que se refiere a los sistemas de secado en horno, e indica que normalmente el primer paso para diseñar una cámara de secado es determinar la pila de madera apropiada según las necesidades del operador. Una cámara hermética y con un buen aislamiento cumple dos objetivos importantes: permite aprovechar la mayor cantidad de calor posible para reducir los costos de secado y evita los daños que podría sufrir la madera por la pérdida de control de la temperatura y la humedad debido a fugas de aire o a un mal aislamiento.

Wood-Mizer [39] recomienda que la madera se apile en niveles de entre 1.2m y 1.8m (4 y 6 pies) de ancho, mientras que la madera de cada nivel debe tener el mismo espesor. Resulta ser que cuando la madera se apila en niveles más estrechos, el secado es más rápido pero el rúmulo es más inestable y puede provocar el desbalanceo o caída de la misma. La longitud de cada nivel corresponde a la longitud de la madera.

En la formación del apilado de la madera, cada nivel va separado con unos espaciadores de madera seca denominados paletas, con espesor de 19mm (3/4in) y el largo de éstas dependen del ancho de la ruma apilada. A continuación, se describen algunas recomendaciones adoptadas por Wood-Mizer [39] para efectuar un correcto apilado de la madera:

- Desde el inicio de uno de los extremos, las paletas se sitúan con una distancia de separado de 610mm (24in).
- Con la finalidad de que el apilado de la madera sea más compacto, se especifica otra configuración de espacios entre paletas y puede ser de 305mm, 406mm, o 457mm, es decir, entre 12, 16, o 18 pulgadas respectivamente.
- Las paletas de cada nivel deben tener una alineación vertical perfecta, con variaciones inferiores a 13mm (0.5in) con respecto a los niveles inferior y superior.

Figura 20. Método de apilado de madera con paletas.



FUENTE: WOOD-MIZER.

Las dimensiones de la madera proporcionadas por la empresa PLANTABAL se indican a continuación:

- Largo de la madera 2, 3 y 4 pies
- Ancho de la madera No hay medida estándar (variable)
- Espesor de la madera 1, 1 ¾, 2, 2 ¼, 3 y 3 ¼ pulgadas.

Las dimensiones de la madera seleccionadas en esta investigación son de 1.22m (4ft) de largo, el ancho debido a que es variable no se especifica su valor y el espesor es de 0.0508 m (2in).

Entonces, con las dimensiones especificadas anteriormente, se puede calcular las dimensiones totales que ocupará la madera en el apilado interno de la cámara de secado. Para ello, cada pila de madera contará con las siguientes dimensiones:

- Largo de la pila de madera 1.22 m
- Ancho de la pila de madera 1.30 m
- Altura de la pila de madera 1.30 m
- Espesor de la madera 0.0508 m
- Espesor de los separadores 0.019 m

En la ecuación 1 se indica la fórmula para calcular el volumen compacto de apilado de madera sin zonas huecas. La ecuación se modifica para considerar los espacios entre la madera aserrada y las paletas de 19mm. Por lo tanto, la ecuación 3 modificada calcula la cantidad volumétrica neta de madera por cada pila, esto en metros cúbicos (m³):

$$Cv_{neta} = l \times a \times h \left(\frac{e_m}{e_m + e_s} \right) \times f_a \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

Cv_{neta} : es la cantidad volumétrica neta de madera por pila.

l : es la longitud de la pila de madera.

a : es el ancho de la pila de madera.

h : es la altura de la pila de madera.

e_m : es el espesor de la madera.

e_s : es el espesor de los separadores.

f_a : es el factor de apilado con un valor recomendado de 0.8.

$$Cv_{neta} = 1.22m \times 1.30m \times 1.30m \left(\frac{0.0508m}{0.0508m + 0.019m} \right) \times 0.8$$

$$Cv_{neta} = 1.20m^3$$

En la práctica, un secado más eficiente se obtiene con cámaras de dimensiones pequeñas, por lo tanto, se recomienda que la cantidad de demanda volumétrica se divida en secciones equivalentes para cámaras del mismo tamaño. Entonces, en esta investigación se considera que la demanda de madera a secar en una cámara de secado híbrida es de 3000 pies tablas o 7.07 metros cúbicos aproximadamente.

Mediante la ecuación 4, se calcula la cantidad de pilas de maderas necesarias para satisfacer el volumen de secado de madera para la empresa:

$$N_{pilas} \approx \frac{C_{total}}{Cv_{neta}} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

N_{pilas} : es la cantidad de pilas de madera.

C_{total} : es la demanda de madera a secar.

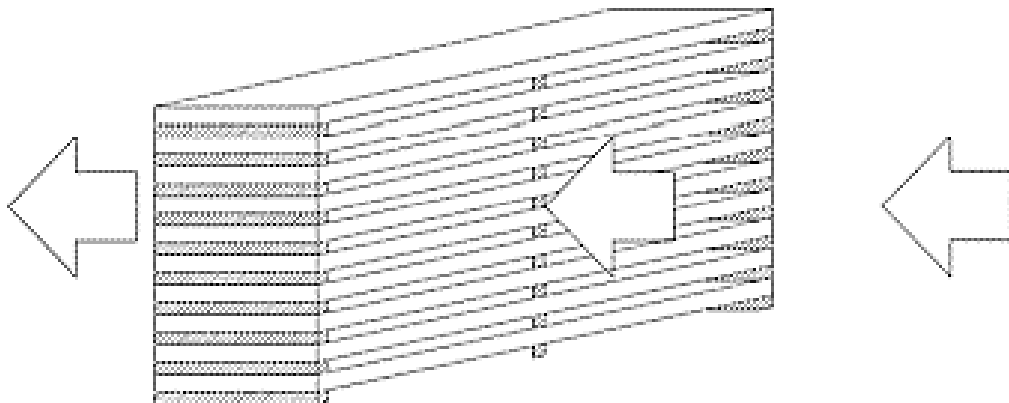
$$N_{pilas} \approx \frac{7.07m^3}{1.20m^3}$$

$$N_{pilas} \approx 6 \text{ pilas}$$

4.4.2.1. Generación de alternativas de diseño.

Con los cálculos realizados en los apartados anteriores, se obtiene que el interior de la cámara de secado debe tener una capacidad para colocar 6 pilas de madera con un volumen total aproximado de $7.07m^3$. Es así que, las dimensiones de la cámara dependerán de la disposición de las pilas de madera en su interior. Entonces, se considera que la longitud de las pilas de madera debe estar colocadas en dirección perpendicular al flujo de aire caliente, garantizando que la extracción de humedad se efectúe de forma continua.

Figura 21. Disposición de la pila de madera perpendicular al flujo de aire caliente.



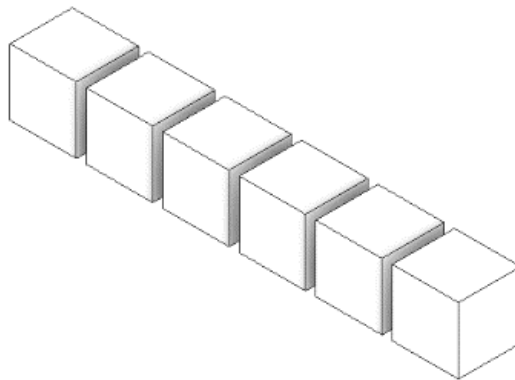
FUENTE: IGNACIO FILIBERTO.

El número total de las pilas de madera deben representar una disposición geométrica que permita un flujo de aire lo más uniforme posible en el interior de la cámara de secado. En consecuencia, dependiendo de la distribución de los rumos de madera serán las dimensiones finales del secador. Por este motivo, se plantean alternativas de solución para escoger la mejor disposición geométrica para las condiciones de operación.

4.4.2.1.1. Alternativa A.

Las pilas de madera son colocadas en línea secuencial en dirección al flujo de aire caliente como se indica en la figura 22.

Figura 22. Pilas de madera alineadas en fila.



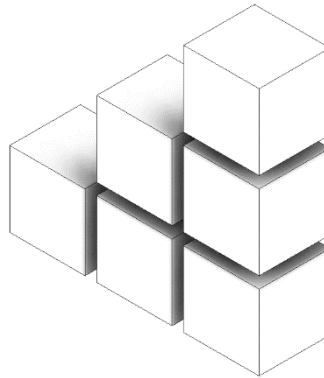
FUENTE: PINCAY DE LA ROSA JAIR RONALDO.

La alternativa A no es una solución deseable para el diseño de la cámara y el número de pilas de madera, debido a que la distancia de recorrido de aire es larga, provoca caídas de velocidad y presión, y como consecuencia se obtiene un secado no uniforme. Además, las dimensiones de la cámara de secado serían demasiadas extensas en esa dirección.

4.4.2.1.2. Alternativa B.

En esta alternativa, las pilas de madera se colocan de forma escalonada en dirección al flujo de aire caliente.

Figura 23. Pilas de madera colocadas en 1 grupo escalonado.



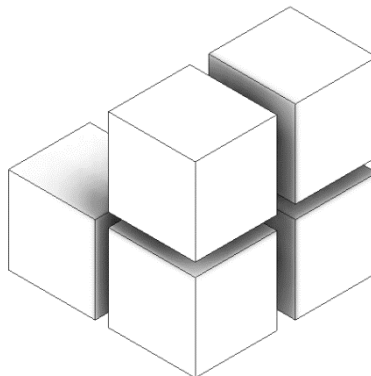
FUENTE: PINCAY DE LA ROSA JAIR RONALDO.

Para la alternativa B, el diseño del secador sería de forma triangular debido a la disposición de la carga de madera, variando toda la estructura esquematizada en ítems anteriores, por lo que no es una solución viable. Además, con esta geometría hace que las dimensiones de la cámara aumenten tanto en ancho como en altura (considérese ancho a la dimensión de la cámara en sentido de dirección del flujo de aire).

4.4.2.1.3. Alternativa C.

La alternativa C presenta una combinación geométrica de forma triangular como en el caso anterior, pero mantiene la configuración esquemática del secador. Esta configuración está conformada por 2 pilas en dirección al flujo de aire y 1 pila encima de ellas. Adicionalmente, se ubica 1 paquete de pilas de madera en dirección longitudinal al secador con la misma configuración, hasta que se completen las 6 pilas de madera a secar.

Figura 24. Pilas de madera colocadas en 2 grupos escalonados.



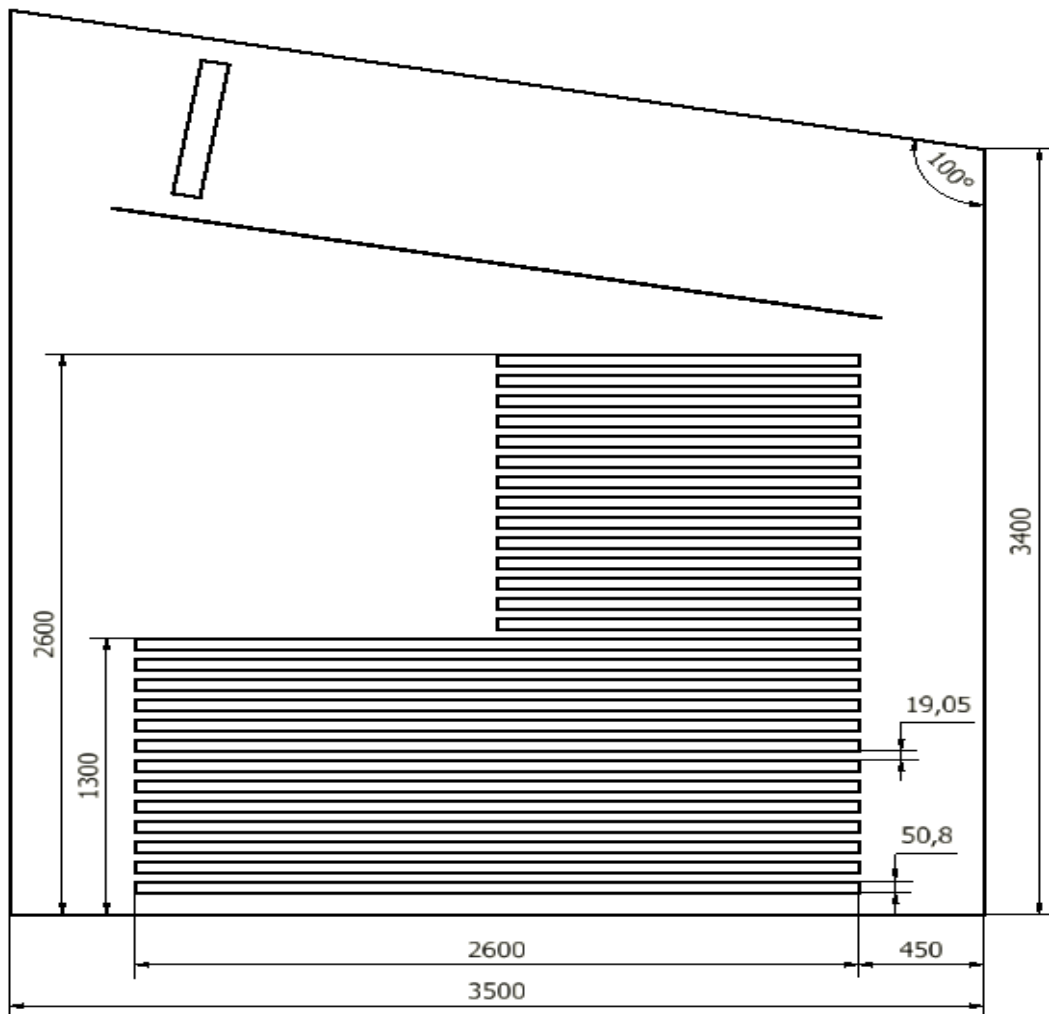
FUENTE: PINCAY DE LA ROSA JAIR RONALDO.

Esta alternativa se presenta como una mejora para las alternativas anteriores, debido a que el flujo de aire disminuye su recorrido por la sección transversal de la pila de madera y se requieren de menor número de ventiladores. Las posibles dimensiones de la cámara interna de secado para esta solución tendrían la siguiente configuración:

- Longitud 3.2m
- Ancho 3.5m
- Altura 3.4m en la parte más baja

Para calcular la parte más alta del secador se debe considerar que el ángulo de inclinación recomendado para la cubierta del techo es de 10° y el ancho del secador es de 3.5 m. Por lo tanto, efectuando la función trigonométrica de tangente para hallar el lado más alto del secador, dio como resultado 4 m.

Figura 25. Configuración geométrica del secador para la alternativa C.

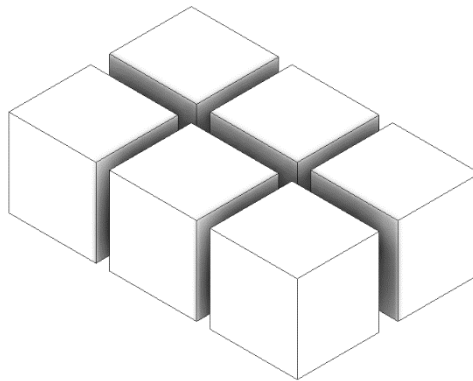


FUENTE: PINCAY DE LA ROSA JAIR RONALDO.

4.4.2.1.4. Alternativa D.

La disposición geométrica de los rumos en la alternativa D tiene forma rectangular, es decir que se colocan 3 pilas en sentido del flujo de aire (ancho del secador) y 1 paquete adicional en dirección longitudinal al secador hasta que se completen las 6 pilas de madera.

Figura 26. Pilas de madera colocadas en dirección al flujo de aire.



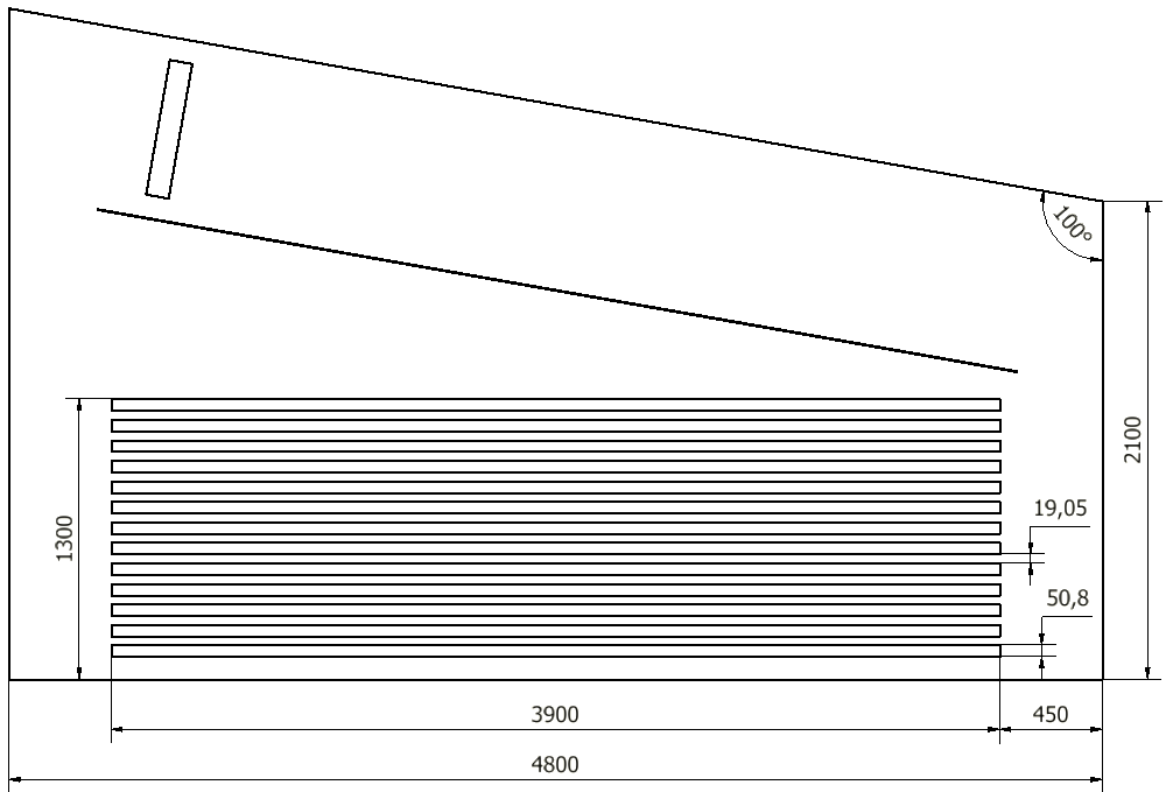
FUENTE: PINCAY DE LA ROSA JAIR RONALDO.

La alternativa D, también es una solución viable ya que la longitud del secador se reduce a 3.2m, pero aumenta el ancho a 4.8m obteniéndose una estructura con recorrido de aire más extenso a diferencia de la alternativa C. La ventaja es que esta nueva modificación permite reducir el número de ventiladores. Las posibles dimensiones de la cámara interna de secado para esta solución tendrían la siguiente configuración:

- Longitud 3.2m
- Ancho 4.8m
- Altura 2.1m en la parte más baja

Para calcular la parte más alta del secador se debe considerar que el ángulo de inclinación recomendado para la cubierta del techo es de 10° y el ancho del secador es de 4.8m. Por lo tanto, calculando con la función trigonométrica de tangente para hallar el lado más alto del secador, se tiene como resultado 2.9 m (ver figura 27).

Figura 27. Configuración geométrica del secador para la alternativa D.

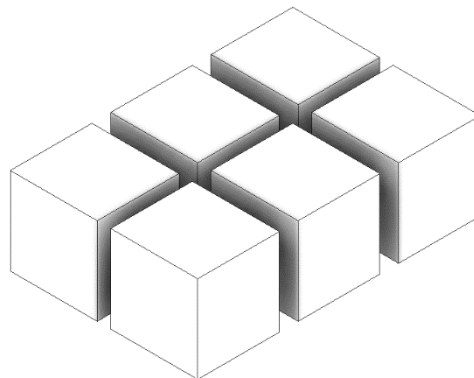


FUENTE: PINCAY DE LA ROSA JAIR RONALDO.

4.4.2.1.5. Alternativa E.

Para esta alternativa, 2 pilas de madera se colocan en dirección al flujo de aire. Luego, se ubican dos paquetes adicionales con la misma disposición, pero en dirección longitudinal del secador, formando un total de 6 pilas de madera.

Figura 28. Pilas de madera colocadas en dirección longitudinal.



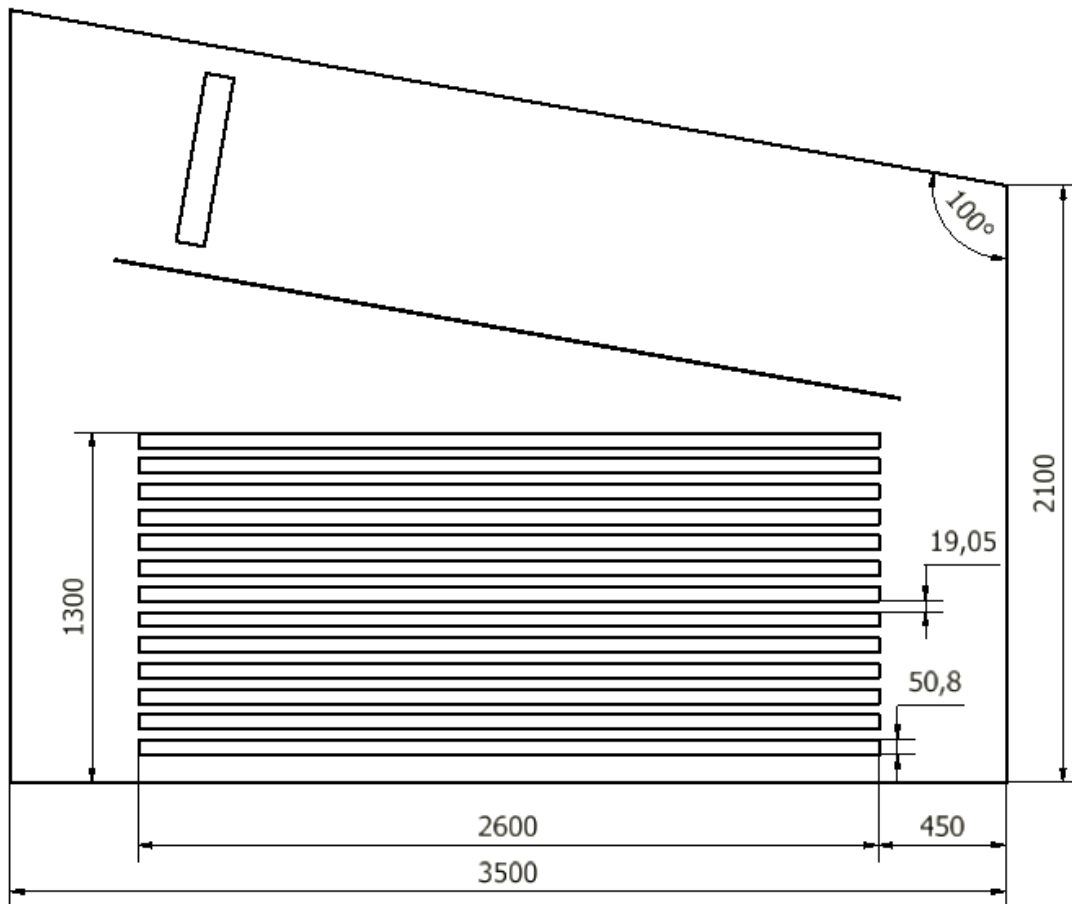
FUENTE: PINCAY DE LA ROSA JAIR RONALDO.

Esta alternativa es una solución viable para la disposición de las pilas de madera, el inconveniente que presenta es que se obtienen dimensiones extensas en dirección longitudinal del secador alrededor de los 4.5 metros. Esto provoca que se incluyan más ventiladores para satisfacer que el flujo de aire circule por la madera de manera más uniforme. Las posibles dimensiones de la cámara interna de secado para esta solución tendrían la siguiente configuración:

- Longitud 4.5m
- Ancho 3.5m
- Altura 2.1m en la parte más baja

Para calcular la parte más alta del secador se debe considerar que el ángulo de inclinación recomendado para la cubierta del techo es de 10° y el ancho del secador es de 3.5m. Por lo tanto, calculando con la función trigonométrica de tangente para hallar el lado más alto del secador, se tiene como resultado 2.7 m.

Figura 29. Configuración geométrica del secador para la alternativa E.



FUENTE: PINCAY DE LA ROSA JAIR RONALDO.

4.4.2.2. Evaluación de alternativas de diseño

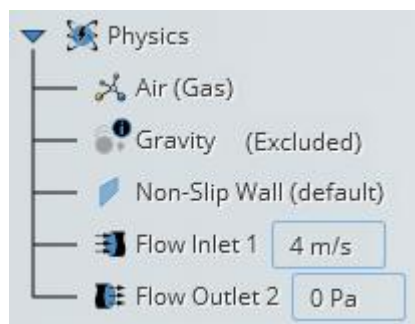
Antes de iniciar con el proceso de evaluación, es notable hacer énfasis que las alternativas de diseño A y B propuestas no satisfacen las condiciones requeridas, siendo soluciones no viables para la investigación.

La evaluación de las alternativas presentadas para la disposición interna de las pilas de madera se realiza mediante simulación multifísica por el método de los volúmenes finitos. La finalidad es determinar las condiciones que satisfacen el requerimiento de un flujo uniforme de aire sobre la pila de madera sin considerar la variación de temperatura. La mejor alternativa que se elige permitirá conocer las dimensiones aproximadas de la cámara de secado híbrida para madera de balsa.

La simulación fluidodinámica se realiza en el software ANSYS Discovery Live 2021 R1, debido a su análisis instantáneo se evaluarán la caída de velocidad y presión al final de la pila de madera. Para ello, el dominio que representa el volumen de control (aire) en el interior del secador se analiza en estado estacionario.

En las alternativas C, D y E se considera como primer parámetro, la velocidad de entrada del aire desde los ventiladores con un valor de 4 m/seg, este dato es aproximado debido a que la determinación real del flujo de aire que debe emitir los ventiladores aún no se ha calculado, pero se sabe que el flujo debe fluir entre 2 y 3 m/seg desde el ingreso hasta la salida de la pila de madera. La presión es la segunda condición de flujo, pero esta vez se referencia con la salida del fluido de aire con un valor de 0 Pa.

Figura 30. Condiciones de flujo para el volumen de control del secador.



FUENTE: PINCAY DE LA ROSA JAIR RONALDO.

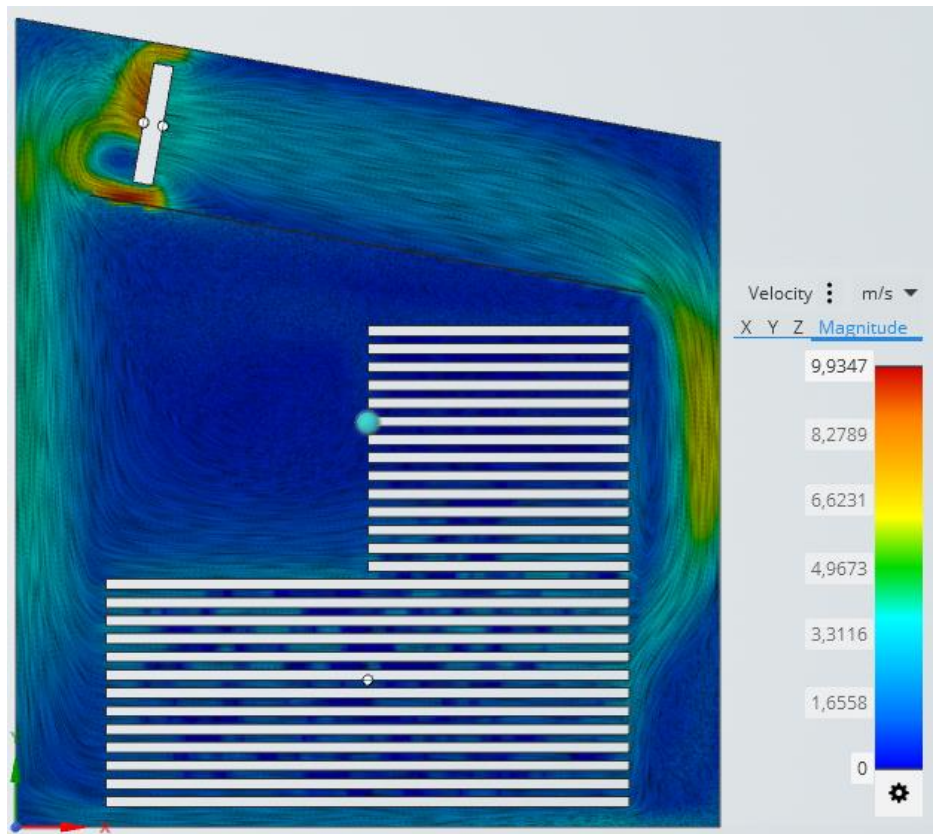
Además, cabe mencionar que para la simulación se utiliza una licencia versión estudiantil de ANSYS, por lo tanto, limita la generación de la malla del dominio a 512000 nodos o

elementos; y motivo por el cual se trata de generar un mallado eficiente acorde a estas restricciones.

4.4.2.2.1. Simulación y evaluación de la alternativa C.

En la figura 31 se observa los perfiles de velocidades y dirección del flujo de aire en el interior de la cámara de secado (de izquierda a derecha). Se aprecia una aceleración del flujo al final del colector solar debido al cambio de sección transversal que recorre el aire. El aire se distribuye por toda la pila de madera inferior, pero en la pila superior disminuye significativamente la velocidad del aire debido a la formación de un vórtice de velocidad en la esquina superior derecha del rumpo de madera.

Figura 31. Campos de dirección de velocidad en la simulación de la alternativa C.

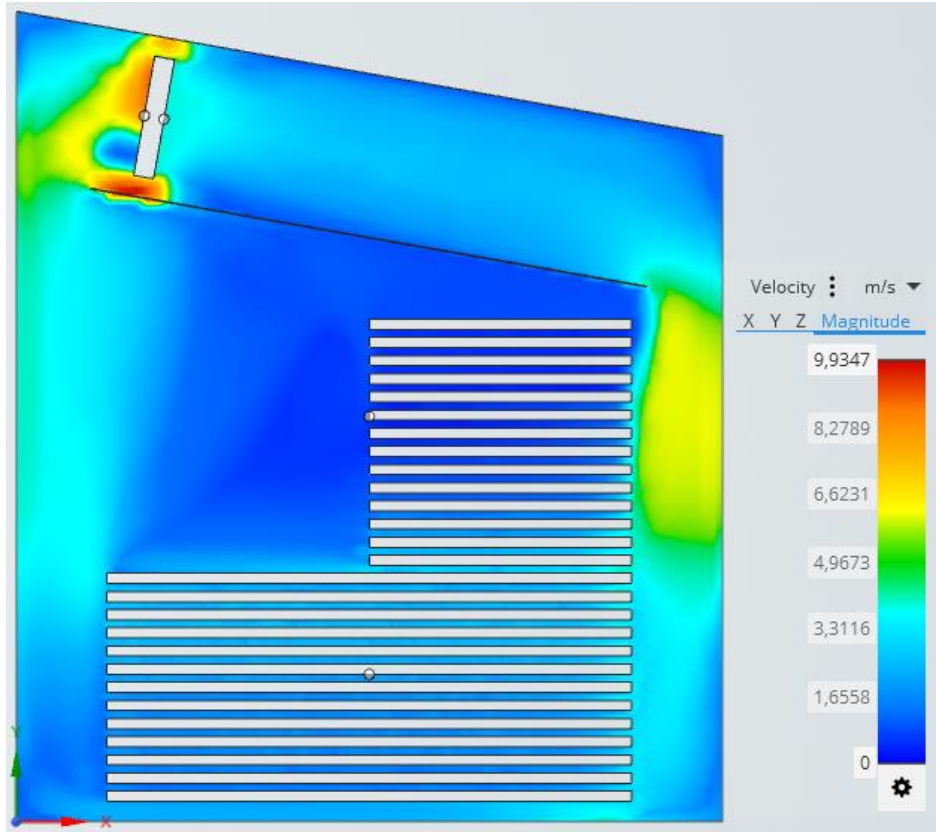


FUENTE: PINCAY DE LA ROSA JAIR RONALDO.

Los contornos de velocidad mostrados en la figura 32 indica que el aire ingresa a la pila de madera ubicada en la zona inferior con una velocidad de 3.3 m/seg y sale a 1.6 m/seg aproximadamente. En la pila de madera superior se observan contornos muy bajos de velocidad, lo cual indica que el aire no fluye con normalidad. Por lo tanto, se concluye que

esta alternativa de diseño no es una solución viable y no satisface las condiciones de flujo uniforme que atravesase por las pilas de madera.

Figura 32. Contornos de velocidad en la simulación de la alternativa C.



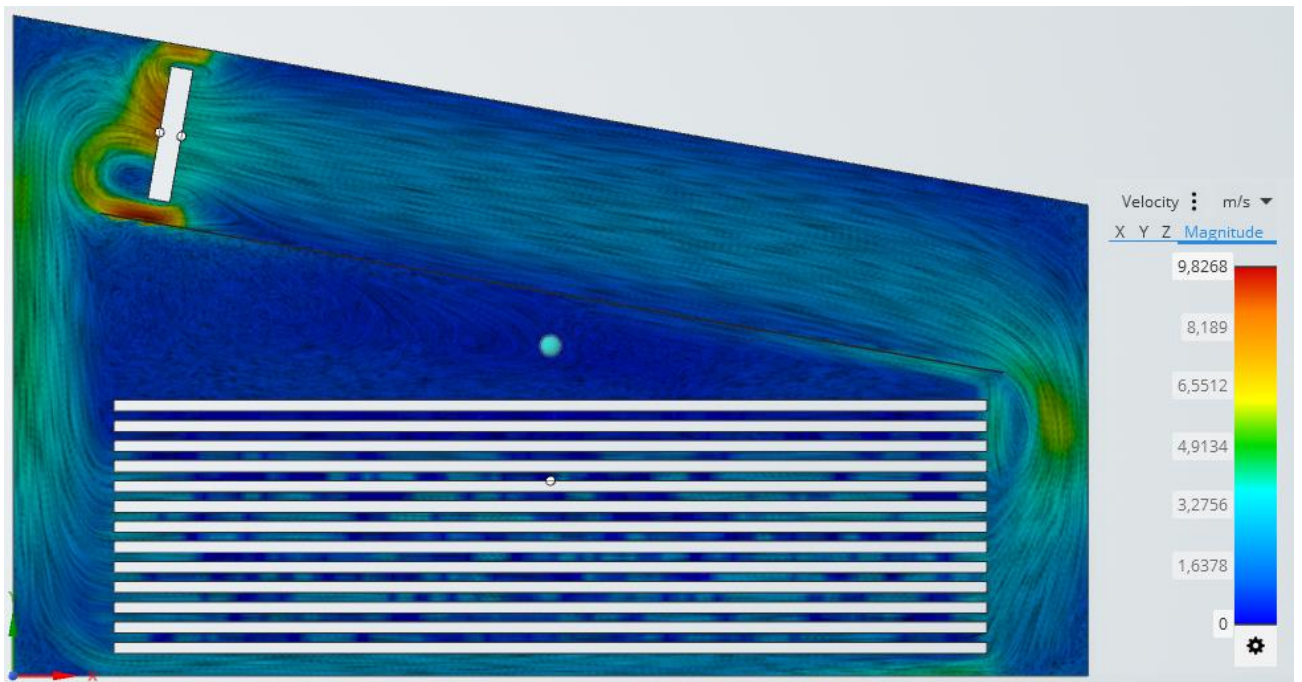
FUENTE: PINCAY DE LA ROSA JAIR RONALDO.

4.4.2.2. Simulación y evaluación de la alternativa D.

En la simulación de la alternativa D se dispone de un volumen de control más amplio, debiendo recorrer más distancia el flujo de aire sobre la pila de madera a diferencia de la alternativa C, esto se debe a la configuración geométrica del rumbo de madera. En la figura 33 se observa un flujo más uniforme sobre las pilas de madera en el rango de 2 a 3 m/seg, y en la parte superior del rumbo de madera se aprecia una zona de recirculación lenta. Esta nueva configuración permite recircular el aire con más facilidad a diferencia de la alternativa C, pero se sigue apreciando un vórtice de velocidad en la esquina superior derecha de la pila, pero en menor magnitud.

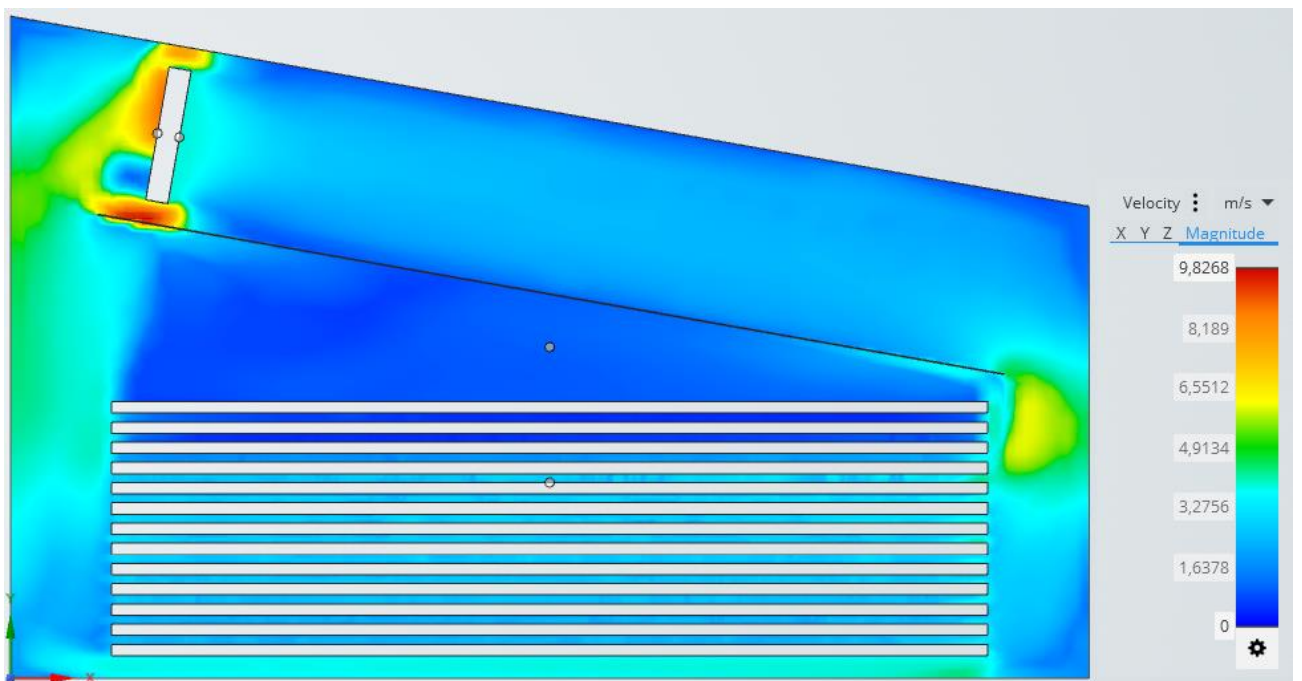
En la figura 34 se observa que los contornos de velocidad son más uniformes cuando el aire recorre por toda la superficie de la madera. Entonces, se concluye que la alternativa D es una solución viable.

Figura 33. Campos de dirección de velocidad en la simulación de la alternativa D.



FUENTE: PINCAY DE LA ROSA JAIR RONALDO.

Figura 34. Contornos de velocidad en la simulación de la alternativa D.



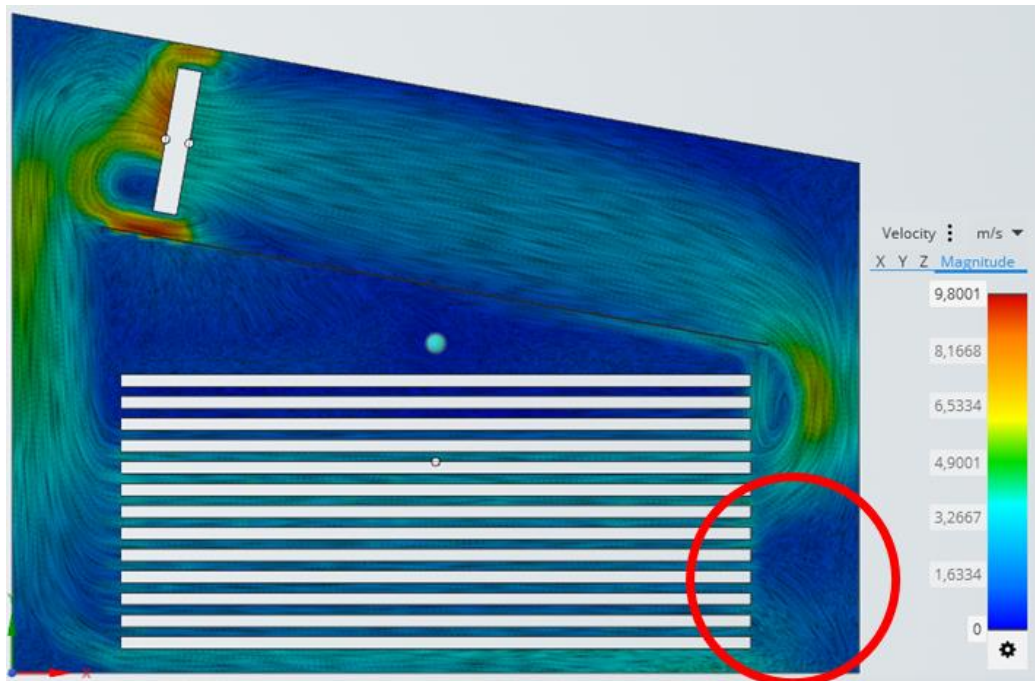
FUENTE: PINCAY DE LA ROSA JAIR RONALDO.

4.4.2.2.3. Simulación y evaluación de la alternativa E.

El método de apilado propuesto en esta alternativa es más compacto, el recorrido del aire sobre la pila de madera es menor a diferencia de la alternativa D, pero se requiere de un mayor número de ventiladores para satisfacer el flujo volumétrico de aire sobre la pila de madera.

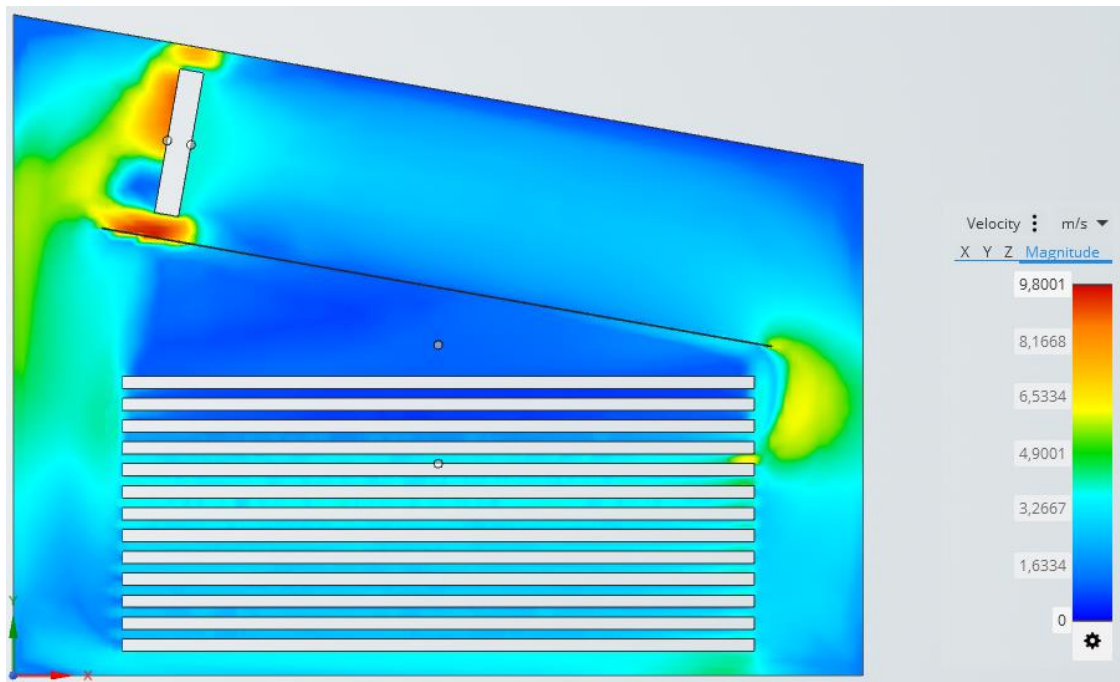
En la simulación de la alternativa E se aprecia que en la zona de ingreso (circunferencia marcada de rojo) se producen campos de velocidad en distintas direcciones, provocando una zona de recirculación de aire y no permite obtener un flujo continuo en la superficie de la madera, como se observa en la figura 35. De igual manera, se sigue observando el vórtice de velocidad en la esquina superior derecha de la pila de madera.

Figura 35. Campos de dirección de velocidad en la simulación de la alternativa E.



FUENTE: PINCAY DE LA ROSA JAIR RONALDO.

Figura 36. Contornos de velocidad en la simulación de la alternativa E.



FUENTE: PINCAY DE LA ROSA JAIR RONALDO.

Por consiguiente, las alternativas D y E son viables para las condiciones de flujo uniforme, pero la alternativa E requiere de más ventiladores debido a la disposición de las pilas de madera. En conclusión, la alternativa de diseño D es la más indicada para satisfacer la demanda de secado para madera de balsa.

4.4.3. Velocidad de los ventiladores.

Los ventiladores de los hornos más grandes suelen ser reversibles, lo que hace que el aire atraviese la pila de madera en una dirección y más tarde en el sentido opuesto, evitando que en la madera se produzca un secado no homogéneo. Además, esto elimina los puntos a los que no llegaría el aire debido a la configuración de apilado de la madera.

Por norma general, toda madera que esté apilada a más de 3.65m (12 pies) de ancho en la dirección del flujo de aire debería contar con ventiladores reversibles. Si la pila de madera tiene menos de 3,65m (12 pies) de profundidad, los ventiladores reversibles no supondrán una diferencia significativa en el proceso de secado.

Por otra parte, mediante la simulación y evaluación de alternativas de diseño se pudo verificar que la alternativa D presenta mejor flujo uniforme de aire en el interior de la cámara

de secado. Entonces, las dimensiones del secador se encuentran definidas de la siguiente manera:

- Longitud 3.2m
- Ancho 4.8m
- Altura 2.1m en la parte más baja

Para seleccionar el ventilador que se utilizará para impulsar el aire caliente, es necesario calcular el flujo volumétrico de aire que debe circular por la sección transversal de las pilas de madera.

La sección transversal que atraviesa el flujo de aire está determinada por la configuración geométrica de las pilas de madera, y por las dimensiones de la cámara de secado (ver figura 26). A continuación, se detallan las dimensiones generales de cada pila de madera y con ellas lograr calcular el área de flujo:

- Largo de la pila de madera 1.22 m
- Ancho de la pila de madera 1.30 m
- Altura de la pila de madera 1.30 m
- Espesor de la madera 0.0508 m
- Espesor de los separadores 0.019 m

Se considera que el flujo de aire circula por los espacios huecos de las pilas de madera, es decir, las zonas vacías entre las tablas y los espaciadores (ver figura 37), y por las áreas con espacios cercanos a los rumos de madera. Entonces, la sección transversal total por la que circula el flujo de aire caliente es de 1.7m^2 .

Una vez obtenida el área trasversal por donde circula el flujo de aire, se procede a calcular el caudal necesario del fluido que debe circular por la pila de madera, aplicando la siguiente ecuación:

$$\dot{V} = v \times A \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

\dot{V} : es el caudal de aire que debe fluir por la madera (m^3/h).

A : es el área transversal por donde circula el fluido (m^2).

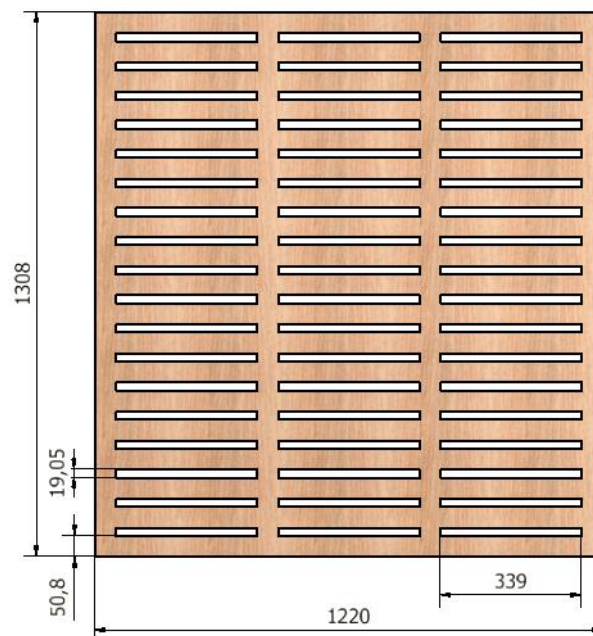
v : es la velocidad de flujo de aire recomendado para secar madera de balsa con espesores de 2 pulgadas. Fuentes [40] recomienda en su investigación velocidades de flujo de aire sobre la madera de 2 a 3 m/seg. Se escoge una velocidad promedio de 2.5 m/seg.

$$\dot{V} = \left(2.5 \frac{m}{seg}\right) \times 1.7m^2$$

$$\dot{V} = 4.25 \frac{m^3}{seg} \times \frac{3600seg}{1h}$$

$$\dot{V} = 15300 \frac{m^3}{h}$$

Figura 37. Espacios huecos en la pila de madera para la circulación de aire caliente.



FUENTE: PINCAY DE LA ROSA JAIR RONALDO.

En el transcurso de la circulación del fluido hacia la pila de madera se producen pérdidas por desviaciones de flujo de aire, por lo tanto, para compensar dichas pérdidas se agrega un 25% de flujo al caudal calculado. El nuevo valor de la tasa de caudal volumétrico es igual a $19125 \frac{m^3}{h}$.

El ventilador a seleccionar debe ser de flujo axial, resistente a condiciones severas de oxidación y corrosión, y temperaturas de operación altas. Sodeca [41] es una empresa centrada en la producción de ventiladores industriales, sistemas de ventilación y extractores, ha diseñado ventiladores con la mejor tecnología y experiencia para soportar temperaturas

de trabajo de hasta 90°C en secaderos de madera, siendo así una alternativa idónea para seleccionar el ventilador adecuado que cumpla con las especificaciones mencionadas con anterioridad.

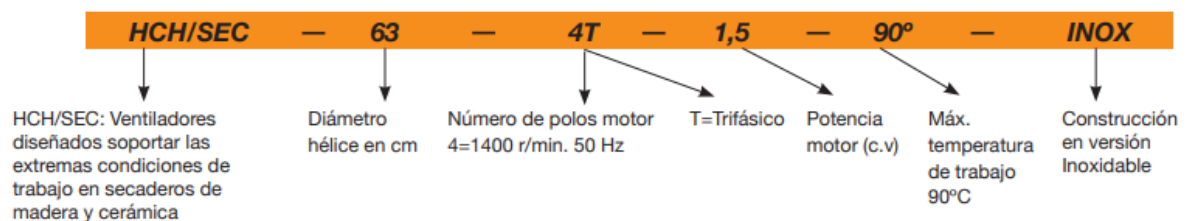
Las características técnicas generales que identifican al ventilador se describen a continuación:

- El modelo del ventilador es HCH/SEC de la empresa SODECA.
- Contiene un aro soporte en chapa de acero o inoxidable AISI-304.
- Hélice en fundición de aluminio.
- Motores clases H, con rodamientos a bolas especialmente diseñados para altas temperatura.
- Motores trifásicos de 230/400V-50Hz y 400/690V-50Hz.
- Temperatura de trabajo: -10°C a 90°C y 100% humedad relativa.
- Acabado anticorrosivo en resina de poliéster polimerizada a 190°C.

El ventilador seleccionado para satisfacer un caudal de $19125 \frac{m^3}{h}$ es el modelo HCH/SEC-63-4T-1,5 y presenta las siguientes características técnicas específicas (ver figura38):

- Velocidad de rotación del eje: 1450 rpm.
- Potencia instalada: 1.1 kW.
- Caudal máximo: $17000 \frac{m^3}{h}$.
- Nivel de presión sonora: 74 dB.
- Peso aproximado: 39 Kg.

Figura 38. Modelo del ventilador con las características técnicas.



FUENTE: SODECA.

El número de ventiladores requeridos para esta aplicación es de 2, colocados en paralelo. En el anexo 6 se indican las dimensiones generales para este tipo de ventilador, así como sus características técnicas.

4.4.4. Colector solar.

En el diseño conceptual, se propuso un colector como alternativa de diseño para captar la radiación solar y transformarla en energía térmica durante el día. En días nublados y nocturnos, se propone utilizar una caldera de vapor para satisfacer las demandas de temperaturas del programa de secado y mantener el funcionamiento continuo de la cámara de secado, formándose así el sistema híbrido.

La empresa PLANTABAL dispone de una caldera de biomasa residual para generar vapor y satisfacer la demanda de energía de los hornos convencionales de secado. Por lo tanto, se sugiere utilizar la misma caldera para enviar vapor a la cámara de secado híbrida propuesta en esta investigación.

Para garantizar la eficiencia del aprovechamiento de los rayos solares en la cámara de secado, primero debe darse el fenómeno del efecto invernadero. Este fenómeno consiste en que una cubierta compuesta por una lámina transparente captura y deja pasar los rayos de onda corta emitidos por el sol, luego se refleja en el colector convirtiéndose en onda larga y no puede escapar. Por lo tanto, para que se produzca el efecto invernadero en el interior de la cámara de secado, es necesario disponer de dos componentes: la cubierta transparente (techo) y el colector.

El tipo de material transparente para el techo debe transmitir los rayos del sol y ser captados por el colector, más no reflejarlos. El material usado en la cubierta, en cierta medida, afecta la cantidad de radiación solar que se puede capturar y convertir en energía térmica.

El material recomendable para estas aplicaciones es el vidrio, debido a que transmite más del 90% de la radiación emitida por el sol cuando cruza a través de él la onda corta, según datos obtenidos de Cengel [20]. Por otra parte, el vidrio se comporta como material opaco cuando intenta atravesar ondas largas a través de él, es decir que el vidrio es un material que permite que ingrese los rayos solares, pero no deja escapar la radiación interna proveniente de la superficie del colector, provocando el aumento de temperatura del aire interno de la cámara de secado.

El vidrio usado en el techo del secador híbrido debe poseer valores elevados de resistencia a la flexión en presencia de cargas externas o por peso propio del material. El material indicado para esta aplicación es el vidrio templado al horno debido a su capacidad de evitar la propagación de fisuras superficiales. La rotura de los vidrios templados se presenta en

multitud de pequeños cubos de vidrio, eliminando el peligro que comporta el vidrio recocido y, por tanto, es considerado como un vidrio de seguridad. El espesor del vidrio templado es de 10mm para una mejor resistencia.

En esta investigación, se usa un colector plano pintado de color negro mate con un espesor de 3mm. Los colectores contruidos con láminas de espesores más finos permiten que el material se enfríe en menor tiempo en ausencia de rayos solares [42]. El color negro del material se debe a que “un cuerpo negro es un emisor y absorbedor perfecto de la radiación. A una temperatura y una longitud de onda específica, ninguna superficie puede emitir más energía que un cuerpo negro” [20].

Otro factor que influye en la eficiencia para absorber calor, es la inclinación del colector solar con referencia a la horizontal. El techo del secador debe estar en dirección de Norte a Sur o de Sur a Norte, dependiendo de las coordenadas geográficas de ubicación del lugar de investigación. Adicionalmente, también es necesario investigar la latitud del lugar de ubicación, debido a que esta información permite establecer el ángulo de inclinación del techo del secador.

La ciudad de Quevedo se encuentra en el hemisferio Sur, por lo tanto, es recomendable que la inclinación de la cámara de secado se ubique de Sur a Norte. Debido a que la posición del Sol cambia constantemente durante los meses del año y durante el día, es recomendable usar un ángulo de 10° para la inclinación del colector solar.

4.4.4.1. Análisis energético del colector solar plano.

El balance de energía para cualquier sistema que pasa por cualquier proceso se expresa mediante la ecuación 6, lo cual indica que el cambio en el contenido de energía de un sistema durante un proceso es igual a la diferencia entre la entrada y la salida de energía [20]. La ecuación de la conservación de la energía está determinada por:

$$\dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sal} = \Delta\dot{E}_{sistema} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Durante un proceso de flujo estacionario, el contenido total de energía de un volumen de control permanece constante (y, por lo tanto, $\Delta\dot{E}_{sistema} = 0$) y la cantidad de energía que entra a un volumen de control en todas las formas debe ser igual a la cantidad de energía que sale de ese volumen. Entonces, para un proceso de flujo estacionario, la forma de balance de la ecuación general de la energía se reduce a la ecuación 7 [20].

$$\dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sal} = 0 \quad (\text{Ecuación 7})$$

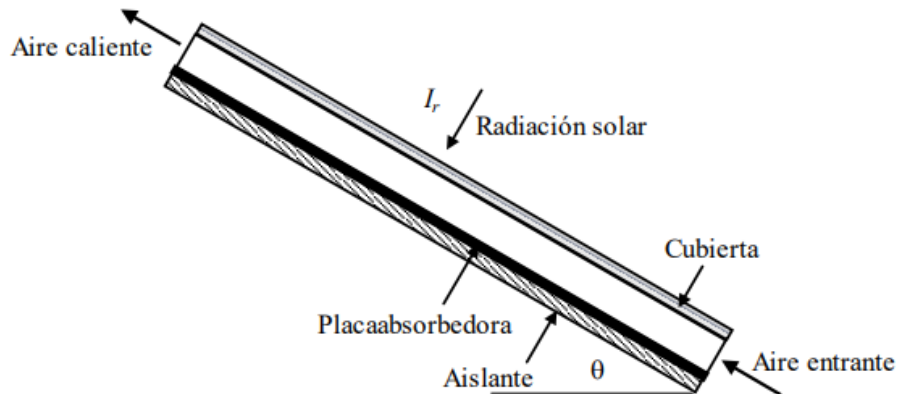
Donde:

\dot{E}_{ent} : Es la energía que ingresa al colector solar.

\dot{E}_{sal} : Es la energía que sale del colector solar en razón de pérdidas de calor.

$\Delta\dot{E}_{sistema}$: Es la variación del contenido de energía presente en el sistema.

Figura 39. Esquema funcional del colector solar.



FUENTE: KOULIBALY AMADOU & GONZÁLEZ JUAN.

Debido a que las temperaturas de la cubierta, placa absorbedora y salida del fluido son desconocidas, es necesario plantear un balance energético de cada componente del colector para obtener un sistema de ecuaciones que permita conocer la temperatura del fluido a la salida del colector. Con este dato, es posible calcular la eficiencia energética del sistema cuando incide radiación solar sobre la placa absorbedora del colector.

4.4.4.2. Balance de energía en la cubierta de vidrio.

En la figura 40, se indican las energías de entrada y salida para la cubierta de vidrio del colector, y se determinan mediante la ecuación 8.

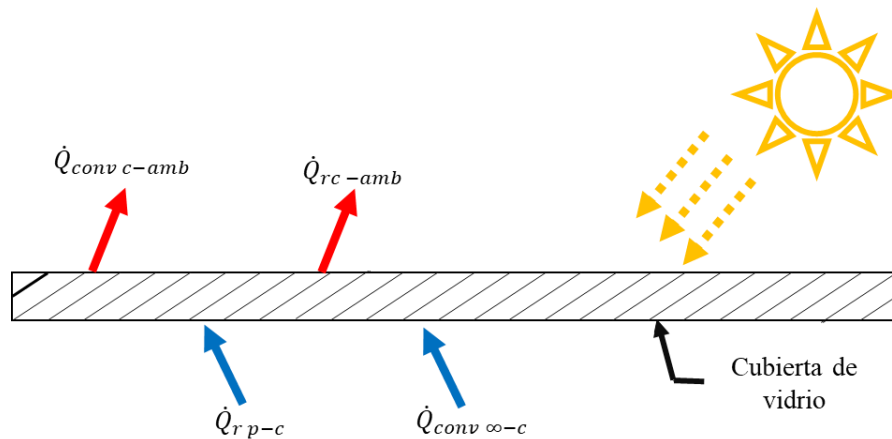
$$\dot{E}_{ent-c} - \dot{E}_{sal-c} = 0. \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde:

\dot{E}_{ent-c} : Es la energía que ingresa a la cubierta de vidrio.

\dot{E}_{sal-c} : Es la energía que sale de la cubierta de vidrio en razón de pérdidas de calor hacia el exterior.

Figura 40. Esquema energético para la cubierta de vidrio.



FUENTE: PINCAY DE LA ROSA JAIR RONALDO.

La cubierta de vidrio se comporta como un cuerpo transparente que permite el paso de la radiación solar hacia la placa absorbente, y absorbe energía mediante dos maneras: el calor por radiación emitido desde la placa y el calor cedido por convección desde el fluido que circula en el interior del colector.

La ecuación 9 indica la transferencia de calor por radiación entre dos placas paralelas infinitamente grandes, en la cual el área de la placa y cubierta son iguales, como lo indica Cengel & Ghajar [20].

$$\dot{Q}_{r\ p-c} = \frac{A_p \sigma (T_p^4 - T_c^4)}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1} \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde:

$\dot{Q}_{r\ p-c}$: Es la transferencia de calor por radiación desde la placa hacia la cubierta (W).

A_p : Es el área de la placa absorbente (m^2).

σ : Es la constante de Stefan-Boltzmann, cuyo valor es igual a $5.67 \times 10^{-8} (W/m^2 K^4)$.

T_p : Es la temperatura de la placa (K).

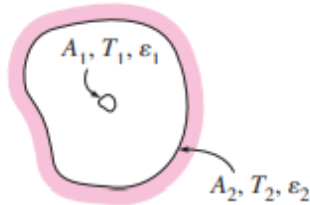
T_c : Es la temperatura de la cubierta (K).

ε_p : Es la emisividad de la placa pintada de color negro mate.

ε_c : Es la emisividad de la cubierta de vidrio transparente.

Figura 41. Relaciones de transferencia de calor por radiación para algunas configuraciones de dos superficies.

Objeto pequeño en una cavidad grande

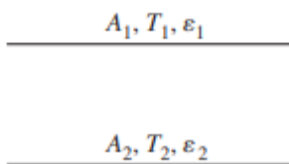


$$\frac{A_1}{A_2} \approx 0$$

$$F_{12} = 1$$

$$\dot{Q}_{12} = A_1 \sigma \epsilon_1 (T_1^4 - T_2^4)$$

Placas paralelas infinitamente grandes

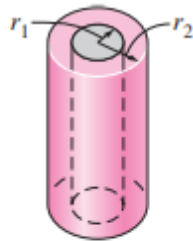


$$A_1 = A_2 = A$$

$$F_{12} = 1$$

$$\dot{Q}_{12} = \frac{A \sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$$

Cilindros concéntricos infinitamente largos

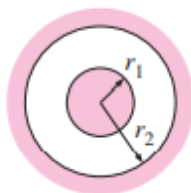


$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{r_1}{r_2}$$

$$F_{12} = 1$$

$$\dot{Q}_{12} = \frac{A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2} \left(\frac{r_1}{r_2}\right)}$$

Esferas concéntricas



$$\frac{A_1}{A_2} = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2$$

$$F_{12} = 1$$

$$\dot{Q}_{12} = \frac{A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2} \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2}$$

FUENTE: CENGEL YUNUS & GHAJAR AFSHIN.

El calor ganado por convección desde el aire interno hacia la cubierta de vidrio, se determina mediante la ecuación 10.

$$\dot{Q}_{conv \infty-c} = h_{\infty} A_c (T_{\infty} - T_c) \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde:

$\dot{Q}_{conv \infty-c}$: Es la transferencia de calor por convección desde el fluido hacia la cubierta (W).

h_{∞} : Es el coeficiente de transferencia de calor por convección del fluido ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$).

A_c : Es el área de la cubierta de vidrio (m^2).

T_{∞} : Es la temperatura promedio del fluido ($^\circ C$).

El coeficiente de transferencia de calor por convección del fluido a lo largo de una placa isotérmica se calcula mediante la ecuación 11. Para calcular este coeficiente, es necesario determinar el número de Nusselt promedio sobre la placa completa. Cengel & Ghajar [20] indican que es conveniente disponer de una sola correlación que se aplique a todos los fluidos sin importar si el régimen es laminar o turbulento. Para ello, propusieron la siguiente relación (ver ecuación 12), la cual es aplicable para todos los números de Prandtl y se afirma que es exacta hasta $\pm 1\%$.

$$h_{\infty} = \frac{k}{L_c} N_u \quad (\text{Ecuación 11})$$

Donde:

k : Es la conductividad térmica del fluido evaluada a su temperatura promedio ($W/m \text{ } ^\circ C$).

L_c : Es la longitud equivalente de la cubierta (m).

N_u : Es el número de Nusselt promedio.

$$N_u = \frac{0.3387 P_r^{1/3} R_e^{1/2}}{[1 + (0.0468/P_r)^{2/3}]^{1/4}} \quad (\text{Ecuación 12})$$

Donde:

P_r : Es el número de Prandtl.

El número de Reynolds puede ser laminar, transición o turbulento, pero con la ecuación 12 no es necesario verificar el régimen de flujo del aire al circular por la placa, pero si es importante determinar su valor promedio a partir de la ecuación 13.

$$R_e = \frac{v_{\infty} L_c}{\nu} \quad (\text{Ecuación 13})$$

Donde:

R_e : Es el número de Reynolds del fluido interno.

v_∞ : Es la velocidad del fluido interno (m/seg).

ν : Es la viscosidad cinemática del fluido evaluada a su temperatura promedio (m^2/seg).

Para tomar en consideración la variación de las propiedades del aire con la temperatura, las propiedades del fluido suelen evaluarse a la temperatura promedio aritmético del mismo, y se encuentra definida por la ecuación 14. De esta forma, se supone que las propiedades del fluido se mantienen constantes en esos valores a lo largo de todo el flujo.

$$T_\infty = \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \quad (\text{Ecuación 14})$$

Donde:

T_{in} : Es la temperatura de entrada del fluido hacia el colector ($^\circ C$).

T_{out} : Es la temperatura de salida del fluido del colector ($^\circ C$).

Por lo tanto, las propiedades del fluido como la conductividad térmica, el número de Prandtl, la viscosidad cinemática, la densidad y el calor específico se deben calcular en función de la temperatura promedio, por lo cual es necesario obtener ecuaciones que satisfagan esta condición. Se tomaron un conjunto de datos de la tabla A-15 del apéndice I del libro de transferencia de calor y masa de Cengel & Ghajar [20] para las propiedades del aire a diferentes temperaturas. Luego, en Excel se efectuó una correlación lineal y línea de tendencia del tipo polinómica para cada propiedad con la cual se obtuvieron las ecuaciones 15, 16, 17, 18 y 19, donde la variable independiente es la temperatura promedio.

$$k = -2.385 \times 10^{-8} T_\infty^2 + 7.554 \times 10^{-5} T_\infty + 0.02364 \quad (\text{Ecuación 15})$$

$$Pr = 3.351 \times 10^{-7} T_\infty^2 - 2.887 \times 10^{-4} T_\infty + 0.7364 \quad (\text{Ecuación 16})$$

$$\nu = 9.630 \times 10^{-11} T_\infty^2 + 8.720 \times 10^{-8} T_\infty + 1.338 \times 10^{-5} \quad (\text{Ecuación 17})$$

$$\rho = 1.092 \times 10^{-5} T_\infty^2 - 4.529 \times 10^{-3} T_\infty + 1.291 \quad (\text{Ecuación 18})$$

$$c_p = 0.0001 T_\infty^2 + 0.0117 T_\infty + 1006.3 \quad (\text{Ecuación 19})$$

Donde:

ρ : Es la densidad del fluido (kg/m^3).

c_p : Es el calor específico del fluido ($J/kg K$).

Las energías que salen de la cubierta de vidrio son pérdidas de calor del colector hacia el medio exterior, las cuales son la transferencia de calor por radiación y la transferencia de calor por convección desde la cubierta hacia el ambiente, y se calculan mediante las ecuaciones 20 y 21 respectivamente.

$$\dot{Q}_{rc-amb} = A_c \sigma \varepsilon_c (T_c^4 - T_{amb}^4) \quad (\text{Ecuación 20})$$

Donde:

\dot{Q}_{rc-amb} : Es la transferencia de calor por radiación desde la cubierta hacia el ambiente (W).

T_{amb} : Es la temperatura del aire ambiente (K).

$$\dot{Q}_{conv c-amb} = h_{c-amb} A_c (T_c - T_{amb}) \quad (\text{Ecuación 21})$$

Donde:

$\dot{Q}_{conv c-amb}$: Es la transferencia de calor por convección desde la cubierta hacia el ambiente (W).

h_{c-amb} : Es el coeficiente de transferencia de calor por convección entre la cubierta y el ambiente ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$).

Según Koulibaly & González [43], el coeficiente de transferencia de calor es caracterizado esencialmente por la velocidad del viento y se calcula mediante la ecuación 22.

$$h_{c-amb} = 5.7 + 3.8v_w \quad (\text{Ecuación 22})$$

Donde:

v_w : Es la velocidad promedio del viento (m/seg).

Entonces, reemplazando las ecuaciones 9, 10, 20 y 21 en la ecuación 8 se tiene el balance general de energía que entra y sale de la cubierta para un sistema en estado estacionario, como se observa en la ecuación 23.

$$\frac{A_p \sigma (T_p^4 - T_c^4)}{\frac{1}{E_p} + \frac{1}{E_c} - 1} + h_\infty A_c (T_\infty - T_c) - A_c \sigma E_c (T_c^4 - T_{amb}^4) - h_{c-amb} A_c (T_c - T_{amb}) = 0 \quad (\text{Ecuación 23})$$

4.4.4.3. Balance de energía en la placa absorbedora.

La placa absorbedora es la parte fundamental del colector y es la que absorbe la radiación solar proveniente del exterior. El balance de energía en estado estacionario, está compuesto por las energías que ingresan y salen de la placa en forma de calor.

$$\dot{E}_{ent-p} - \dot{E}_{sal-p} = 0 \quad (\text{Ecuación 24})$$

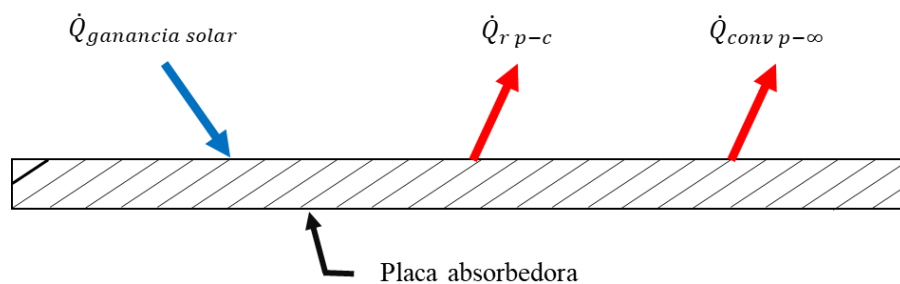
Donde:

\dot{E}_{ent-p} : Es la energía que ingresa a la placa colectora.

\dot{E}_{sal-p} : Es la energía que sale de la placa colectora en forma de radiación y convección.

En la figura 42, se observa que la ganancia de calor en la placa se origina solamente por la radiación solar y, las pérdidas de calor se producen por radiación desde la placa hacia la cubierta y por convección hacia el aire que circula en el interior a la temperatura promedio entre la entrada y salida.

Figura 42. Esquema energético para la placa absorbedora.



FUENTE: PINCAY DE LA ROSA JAIR RONALDO.

La ganancia solar o transferencia de calor por radiación hacia el colector se determina mediante la ecuación 25 y está relacionada con la eficiencia óptica del colector, expresada por el producto de la transmisividad de la cubierta y la absorptividad de la placa [43].

$$\dot{Q}_{ganancia\ solar} = (\tau\alpha) I_r A_p \quad (\text{Ecuación 25})$$

Donde:

$\dot{Q}_{ganancia\ solar}$: Es la transferencia de calor captada por la placa absorbedora debido a la radiación solar (W).

τ : Es la transmisividad de la cubierta.

α : Es la absorptividad de la placa.

I_r : Es la intensidad de radiación incidente en el colector (W/m^2).

La pérdida de calor por convección desde la placa hacia el fluido ($\dot{Q}_{conv\ p-\infty}$) se establece por la ecuación 26, donde el coeficiente de transferencia de calor se calcula mediante las ecuaciones 11, 12, y 13 previamente establecidas, considerando que la longitud característica de la cubierta es de igual magnitud que la placa absorbedora.

$$\dot{Q}_{conv\ p-\infty} = h_{\infty} A_p (T_p - T_{\infty}) \quad (\text{Ecuación 26})$$

Sustituyendo las ecuaciones 9, 25 y 26 en la ecuación 24 se tiene el balance general de energía que entra y sale de la placa colectora para un sistema en estado estacionario, como se observa en la ecuación 27.

$$(\tau\alpha)I_r A_p - \frac{A_p \sigma (T_p^4 - T_c^4)}{\frac{1}{E_p} + \frac{1}{E_c} - 1} - h_{\infty} A_p (T_p - T_{\infty}) = 0 \quad (\text{Ecuación 27})$$

4.4.4.4. Balance de energía en el aire interior del colector.

El aire interior se calienta a partir de la transferencia de energía absorbida por la placa colectora y a su vez éste pierde energía hacia la cubierta de vidrio, como se observa en la figura 43. Por lo tanto, el balance energético para el flujo de aire en estado estacionario se representa por la ecuación 28.

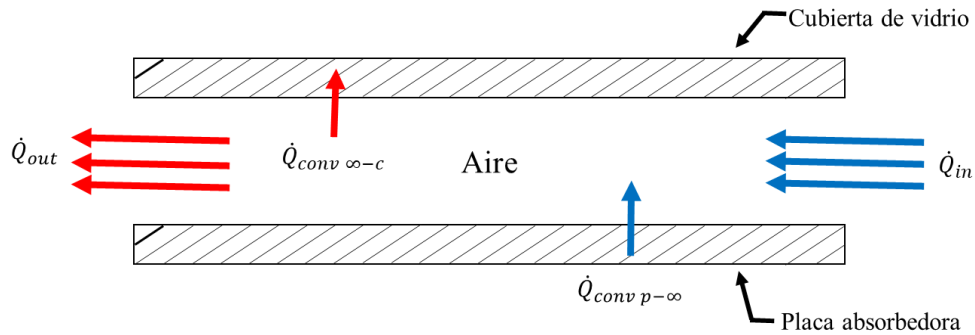
$$\dot{E}_{ent-\infty} - \dot{E}_{sal-\infty} = 0 \quad (\text{Ecuación 28})$$

Donde:

$\dot{E}_{ent-\infty}$: Es la energía que recibe el fluido al circular por la placa colectora.

$\dot{E}_{sal-\infty}$: Es la energía que sale del sistema mediante el flujo de aire.

Figura 43. Esquema energético para el flujo de aire en el colector.



FUENTE: PINCAY DE LA ROSA JAIR RONALDO.

El aire ingresa al colector con una temperatura inicial aproximadamente igual a la temperatura ambiente (T_{amb}), y es así como inicialmente contiene energía (ver ecuación 29). Adicionalmente, la placa absorbedora pierde calor, la cual es cedida al aire por convección y es así como se completan las energías que ingresan al sistema.

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m} C_p T_{in} \quad (\text{Ecuación 29})$$

Donde:

\dot{Q}_{in} : Es la energía que contiene el aire al ingreso del colector solar (W).

\dot{m} : Es el flujo másico del aire (kg/seg).

La energía que sale del sistema de flujo de aire se determina mediante la energía que abandona el colector con la salida de aire (ver ecuación 30) más la energía perdida por el aire al ceder calor a la cubierta del colector.

$$\dot{Q}_{out} = \dot{m} C_p T_{out} \quad (\text{Ecuación 30})$$

Donde:

\dot{Q}_{out} : Es la energía que contiene el aire al salir del colector solar (W).

Entonces, sustituyendo las ecuaciones 10, 26, 29 y 30 en la ecuación 28 se obtiene el balance general de energía para el volumen de control del fluido que circula en el interior del colector, y se indica en la ecuación 31.

$$\dot{m} C_p T_{in} + h_{\infty} A_p (T_p - T_{\infty}) - \dot{m} C_p T_{out} - h_{\infty} A_c (T_{\infty} - T_c) = 0 \quad (\text{Ecuación 31})$$

4.4.4.5. Eficiencia del colector solar.

El rendimiento energético del colector se define como la razón entre la potencia calorífica transmitida a la corriente de fluido cuando fluye por la placa absorbedora, calor útil, y la ganancia de calor transferida por la radiación solar al incidir sobre la placa colectora (ver ecuación 25).

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{\dot{Q}_{ganancia\ solar}} \times 100 \quad (\text{Ecuación 32})$$

Donde:

η : Es la eficiencia del colector solar (%).

\dot{Q}_u : Es el calor útil usado para calentar el aire interno (W) y se calcula mediante la ecuación 33, donde sus términos ya se encuentran definidos.

$$\dot{Q}_u = \dot{m} C_p (T_{out} - T_{in}) \quad (\text{Ecuación 33})$$

Reemplazando las ecuaciones 25 y 33 en la ecuación 32 se obtiene la forma general para calcular la eficiencia del colector calculando previamente las temperaturas de entrada y salida del fluido.

$$\eta = \frac{\dot{m} C_p (T_{out} - T_{in})}{(\tau\alpha) I_r A_p} \times 100 \quad (\text{Ecuación 34})$$

4.4.4.6. Datos meteorológicos de instituciones u observatorios.

4.4.4.6.1. Base de datos INAMHI.

El INAMHI es la entidad técnico-científica responsable en el Ecuador de la generación y difusión de la información hidrometeorológica que sirva de sustento para la formulación y evaluación de los planes de desarrollo nacionales y locales y la realización de investigación propia o por parte de otros actores, aplicada a la vida cotidiana de los habitantes y los sectores estratégicos de la economía; apoyado en personal especializado y en una adecuada utilización de las nuevas tecnologías de la automatización, información y comunicación [44].

Para realizar el monitoreo de las variables atmosféricas, el INAMHI cuenta con estaciones meteorológicas convencionales y automáticas, las mismas que proveen de información en tiempo real de gran importancia para las investigaciones desarrolladas en el país.

A nivel nacional, el INAMHI dispone de 256 estaciones meteorológicas en operación, las cuales se encargan de medir datos de temperatura ambiente, velocidad del viento, humedad atmosférica, precipitación, entre otras variables meteorológicas. La estación más cercana a la ciudad de Quevedo es la Estación Experimental Pichilingue de donde se obtuvieron parte de los valores de temperatura ambiente y velocidad del viento promedios [45].

4.4.4.6.2. Base de datos del CONELEC-CIE.

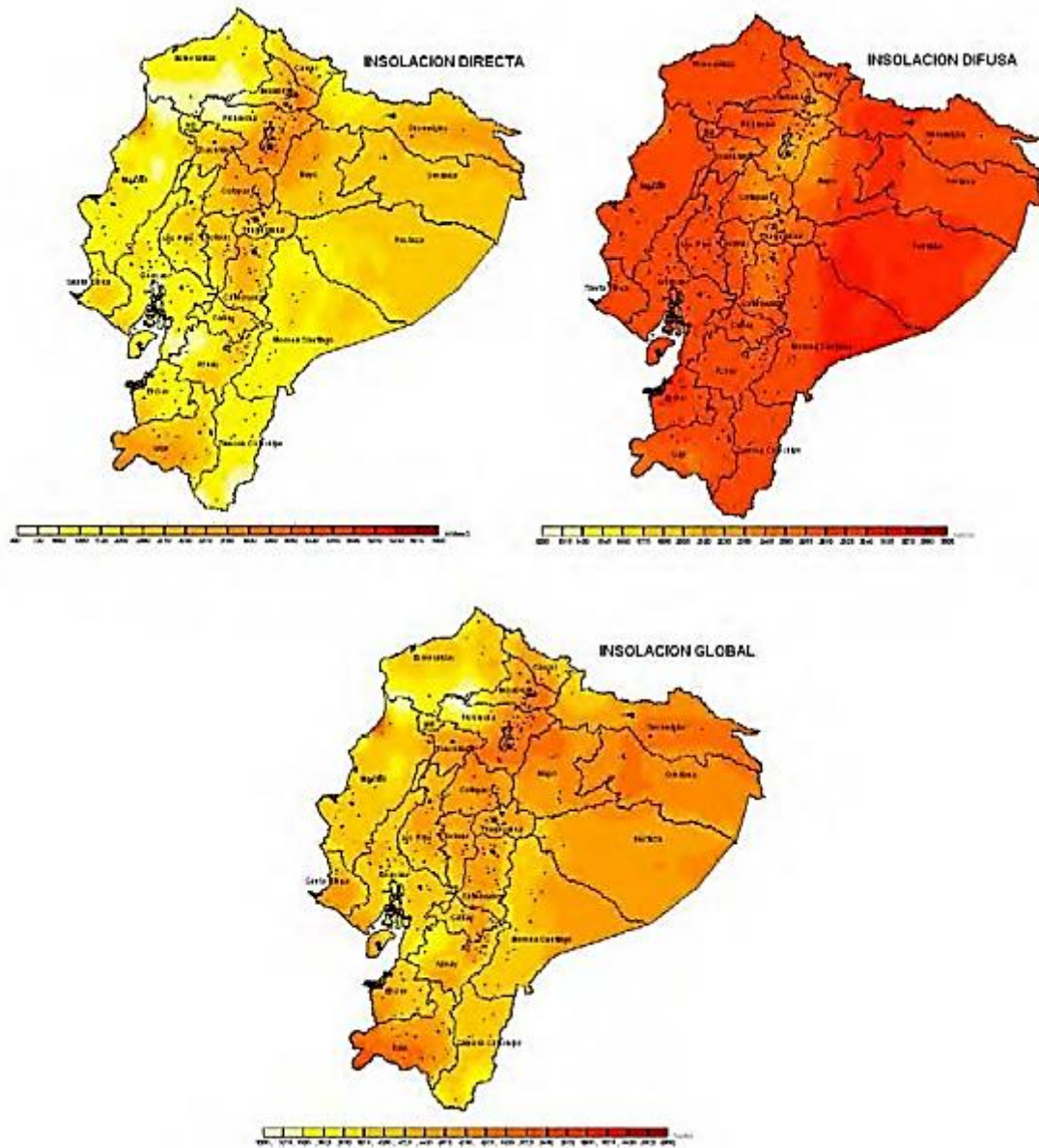
La necesidad de contar con un documento técnico que cumpla con el diseño de políticas, estrategias y medidas para incentivar el mayor uso de las energías limpias que promuevan el desarrollo, a fin de impulsar el uso masivo de la energía solar como fuente energética es lo que ha motivado al Consejo Nacional de Electricidad, CONELEC, a presentar el “Atlas Solar del Ecuador con fines de Generación Eléctrica”, el cual ha sido elaborado por la Corporación para la Investigación Energética, CIE [46].

Este Atlas incluye la cuantificación del potencial solar disponible y con posibilidades de generación eléctrica, en base a mapas mensuales de insolación directa, global y difusa y sus correspondientes isohelias, con el fin de ubicar proyectos locales más específicos que permitan utilizar esta tecnología para obtener calor y electricidad para diversas aplicaciones como fabricar colectores térmicos y módulos fotovoltaicos.

El calor recogido en los colectores se puede destinar a satisfacer numerosas necesidades de la colectividad y la industria, como calefacción, refrigeración y hornos; para fines agrícolas se puede obtener secadores, plantas de purificación o desalinización de agua.

La información disponible, corresponde al período entre el 1 de enero de 1985 y el 31 de diciembre de 1991, y fue publicado en Julio del 2006. Los datos representan la energía solar promedio mensual y anual de los valores diarios la insolación total (directa y difusa) e insolación global sobre una superficie horizontal y contiene los promedios mensuales (dentro del período mencionado) de cada una de ellas, expresados en $\text{Wh/m}^2/\text{día}$ [46].

Figura 44. Insolación en el mes de enero sobre la superficie ecuatoriana.



FUENTE: CONELEC-CIE.

4.4.4.6.3. Base de datos de la NASA.

El manejo de los datos proporcionados por la NASA fue posible mediante un software desarrollado por el Departamento de Recursos Naturales de Canadá, denominado RETScreen.

RETScreen es un sistema de software de gestión de energía limpia para el análisis de viabilidad de proyectos de eficiencia energética, energías renovables y cogeneración, así como análisis de rendimiento energético continuo [47].

El programa RETScreen dispone de una base de datos meteorológicos con ubicación en la Estación Experimental Pichilingue, la cual proporciona datos de temperatura del aire en °C y radiación solar diaria horizontal en kWh/m²/día medido en sitio, y la velocidad del viento en m/seg cuyo valor está medido satelitalmente. Debido a que el análisis de las ecuaciones se realiza en estado estacionario, el valor de los datos es tomado del promedio anual (ver figura 46).

Figura 45. Ubicación de datos meteorológicos en el software RETScreen.

RETScreen - Ubicación Suscriptor: Visualización

Condiciones de referencia del sitio

Ubicación de datos meteorológicos Ubicación de la instalación

Legenda

- Ubicación de la instalación
- Ubicación de datos meteorológicos

	Unidad	Ubicación de datos meteorológicos	Ubicación de la instalación	Fuente
Latitud		-1,1	-1,1	
Longitud		-79,5	-79,5	
Zona climática		1A - Muy caliente - Húmedo		
Elevación	m	120	67	Suelo+NASA
Temperatura de diseño de la calefacción	°C	19,0		Suelo - Mapa
Temperatura de diseño del aire acondicionado	°C	31,5		Suelo
Amplitud de la temperatura del suelo	°C	15,0		NASA

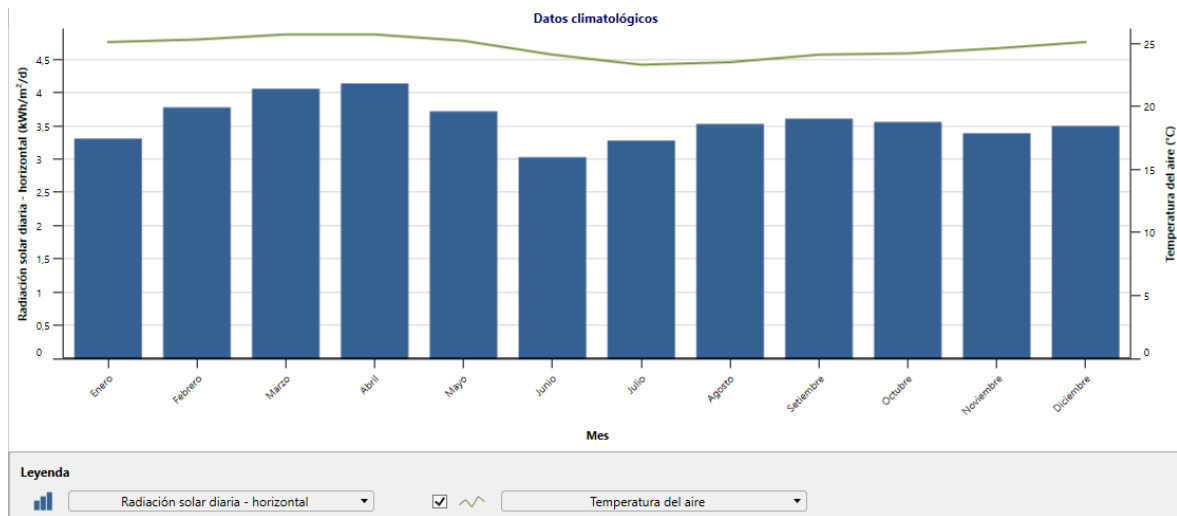
FUENTE: RETSCREEN.

Figura 46. Datos meteorológicos proporcionados por el software RETScreen.

Mes	Temperatura del aire		Precipitación	Radiación solar diaria - horizontal	Presión atmosférica	Velocidad del Viento	Temperatura del suelo	Grados-días de calefacción 18 °C	Grados-días de refrigeración 10 °C
	°C	Humedad relativa %							
Enero	25,1	80,8%	187,24	3,31	87,4	2,5	21,0	0	468
Febrero	25,3	86,9%	245,00	3,78	87,4	2,3	20,5	0	428
Marzo	25,7	87,4%	246,45	4,06	87,4	2,1	20,5	0	487
Abril	25,7	86,7%	214,50	4,14	87,4	1,9	20,6	0	471
Mayo	25,2	83,3%	108,50	3,72	87,5	1,7	20,7	0	471
Junio	24,1	77,6%	54,00	3,03	87,5	1,5	20,5	0	423
Julio	23,3	71,2%	37,20	3,28	87,5	1,5	20,8	0	412
Agosto	23,5	65,6%	28,21	3,53	87,5	1,7	21,6	0	419
Setiembre	24,1	65,0%	39,30	3,61	87,5	2,0	22,2	0	423
Octubre	24,2	67,4%	48,67	3,56	87,5	2,5	22,2	0	440
Noviembre	24,6	68,4%	63,00	3,39	87,4	2,6	22,0	0	438
Diciembre	25,1	72,8%	93,62	3,50	87,4	2,6	21,7	0	468
Anual	24,7	76,0%	1.365,69	3,57	87,4	2,1	21,2	0	5.349
Fuente	Suelo	NASA	NASA	Suelo	NASA	NASA	NASA	Suelo	Suelo
Medido a						m	10	0	

FUENTE: RETSCREEN.

Figura 47. Gráfico de datos climatológicos radiación solar vs temperatura del aire.



FUENTE: RETSCREEN.

4.4.4.7. Datos principales del sistema colector solar.

En la tabla 4 se observan los valores disponibles a utilizar en las ecuaciones de balance de energía planteadas en los literales anteriores. Algunos datos como las propiedades del vidrio y la placa pintada de negro, fueron tomados del libro de transferencia de calor y masa de Cengel & Ghajar [20]. La temperatura ambiente, la velocidad del viento y la intensidad de radiación son equivalentes al valor promedio diario, mensual y anual de las condiciones atmosféricas de la ciudad de Quevedo, y los datos restantes son valores correspondientes al diseño propuesto en la investigación.

Tabla 4. Datos del colector solar.

DEFINICIÓN	SIMBOLOGÍA	VALOR	UNIDADES
Área de la placa absorbadora	A_p	13.12	m^2
Área de la cubierta de vidrio	A_c		
Constante de Stefan-Boltzmann	σ	5.67×10^{-8}	$W/m^2.k^4$
Emisividad de la placa pintada de color negro mate	ϵ_p	0.98	----
Emisividad de la cubierta de vidrio transparente	ϵ_c	0.90	----
Longitud característica de la cubierta	L_c	4.1	m

Caudal volumétrico del aire interno	\dot{V}	34000	m^3/h
Temperatura ambiente	T_{amb}	24.7	$^{\circ}C$
Velocidad promedio del viento	v_w	2.1	m/seg
Transmisividad de la cubierta	τ	0.79	----
Absortividad de la placa	α	0.98	----
Intensidad de radiación incidente en el colector	I_r	3570	$Wh/m^2 * día$
Área de sección transversal al flujo de aire interno	A_t	2.56	m^2

FUENTE: CENGEL & GHAJAR, RETSCREEN.

ELABORADO: PINCAY DE LA ROSA JAIR RONALDO.

Adicionalmente, es necesario disponer de ecuaciones para calcular el flujo másico y la velocidad del aire interno mediante la ecuación 35 y 36, respectivamente, cuando funcionan los dos ventiladores con un flujo volumétrico total de $34000 m^3/h$.

$$\dot{m} = \rho \cdot \dot{V} \quad (\text{Ecuación 35})$$

Donde la densidad (ρ) varía con la temperatura promedio del fluido a la entrada y salida del colector solar y se calcula mediante la ecuación 18 descrita en pasos anteriores. Motivo por el cual aún no es factible determinar el flujo másico del fluido.

$$v_{\infty} = \frac{\dot{V}}{A_t} \quad (\text{Ecuación 36})$$

$$v_{\infty} = \frac{9.44 m^3/seg}{2.56 m^2}$$

$$v_{\infty} = 3.69 m/seg$$

4.4.4.8. Cálculos respectivos del colector solar plano.

En los ítems anteriores se propuso un modelo matemático mediante el balance energético en estado estacionario para cada uno de los componentes del colector solar plano. Por lo tanto, es importante considerar las siguientes hipótesis en el sistema:

- Existen condiciones estacionarias de operación.
- La cubierta de vidrio y la placa absorbadora son isotérmicas.

- El aire es un gas ideal.
- La cubierta de vidrio es transparente a la radiación solar.
- La temperatura de entrada del aire al colector es igual a la temperatura ambiente.

Las propiedades del aire deben evaluarse a la temperatura promedio. Pero no se conoce la temperatura de salida del aire en el interior del colector y, por consiguiente, en este punto no es posible determinar la temperatura de fluido promediada entre la entrada y la salida, ni la temperatura de la cubierta de vidrio, por lo tanto, no se pueden evaluar las temperaturas promedio.

Cengel & Ghajar [20] proponen un método para la solución de ejercicios de este tipo, en la cual se supone una temperatura para la cubierta de vidrio, se promedia con la temperatura del aire ambiente y con este valor de temperatura promedio se evalúan las propiedades del fluido interno. Pues, resulta evidente que la resolución requiere un procedimiento por tanteos para lograr resolver las ecuaciones de balance de energía.

Este procedimiento resulta en un cálculo complejo de tanteo manual, por lo tanto, se propone un algoritmo matemático en Excel para la resolución de ecuaciones con varias incógnitas en cuestión de segundos. Inicialmente se asumen las temperaturas de la cubierta de vidrio, placa absorbidora y temperatura de salida del fluido. Luego, se plantean las ecuaciones de balance de energía para la cubierta, placa y aire interno, y las ecuaciones para determinar el coeficiente de convección por aire forzado, las cuales se encuentran en función de la temperatura promedio del fluido.

Para determinar si el valor de las temperaturas que calcula el software es el correcto, se establecen ciertas restricciones, en la cual la suma de los resultados calculados en el balance de energía debe ser aproximadamente igual a cero.

El modelo matemático propuesto en conjunto con el algoritmo en Excel determinó las siguientes respuestas de temperatura, flujo másico y calor específico del fluido, cuya importancia es fundamental para calcular la eficiencia y el calor útil del colector solar:

- Temperatura de la placa absorbidora (T_p) igual a 73.22 °C.
- Temperatura de la cubierta de vidrio (T_C) igual a 36.88 °C.
- Temperatura de salida del fluido al final del colector solar (T_{out}) igual a 24.83 °C.
- Flujo másico del fluido interno (\dot{m}) igual a 11.20 kg/seg.
- Calor específico del fluido interno (c_p) igual a 1007 J/kg °C.

4.4.4.8.1. Cálculo del rendimiento energético del colector solar plano.

La eficiencia del colector solar se define como la razón entre la potencia calorífica transmitida a la corriente de fluido cuando fluye por la placa absorbadora, calor útil, y la ganancia de calor transferida por la radiación solar al incidir sobre la placa colectora y se determina mediante la ecuación 34 definida anteriormente como:

$$\eta = \frac{\dot{m} C_p (T_{out} - T_{in})}{(\tau\alpha)I_r A_p} \times 100$$
$$\eta = \frac{11.20 \frac{kg}{seg} \left(1007 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C}\right) (24.83 - 24.70)^\circ C}{(0.79 \cdot 0.98) \left(446.25 \frac{W}{m^2}\right) (13.12m^2)} \times 100$$
$$\eta = 32.35 \%$$

La eficiencia calculada es relativamente baja debido a muchas condiciones de estado, una de ellas es que la placa colectora no usa ningún tipo de aislamiento térmico en la superficie inferior de la misma. Otra condición es que el sistema es amplio, por lo tanto, los ventiladores mueven una masa de fluido alta alrededor de 9.44 m³/seg y calentar este flujo a mayor temperatura requiere de hacer recircular el aire por la placa absorbadora.

4.4.4.8.2. Cálculo de la energía útil del colector solar plano.

La energía útil del colector solar plano es usada en forma de calor para calentar el aire que circula en el interior y se determina mediante la ecuación 33 definida anteriormente.

$$\dot{Q}_u = \dot{m} C_p (T_{out} - T_{in})$$
$$\dot{Q}_u = 11.20 \frac{kg}{seg} \left(1007 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C}\right) (24.83 - 24.70)^\circ C$$
$$\dot{Q}_u = 1466.19 W$$
$$\dot{Q}_u = 1.47 kW$$

Entonces, con la implementación de un colector solar plano se obtendría energía efectivamente aprovechable alrededor de 1.47 kW por día, equivalente a 44 kW al mes y 530 kW de energía por año aproximadamente.

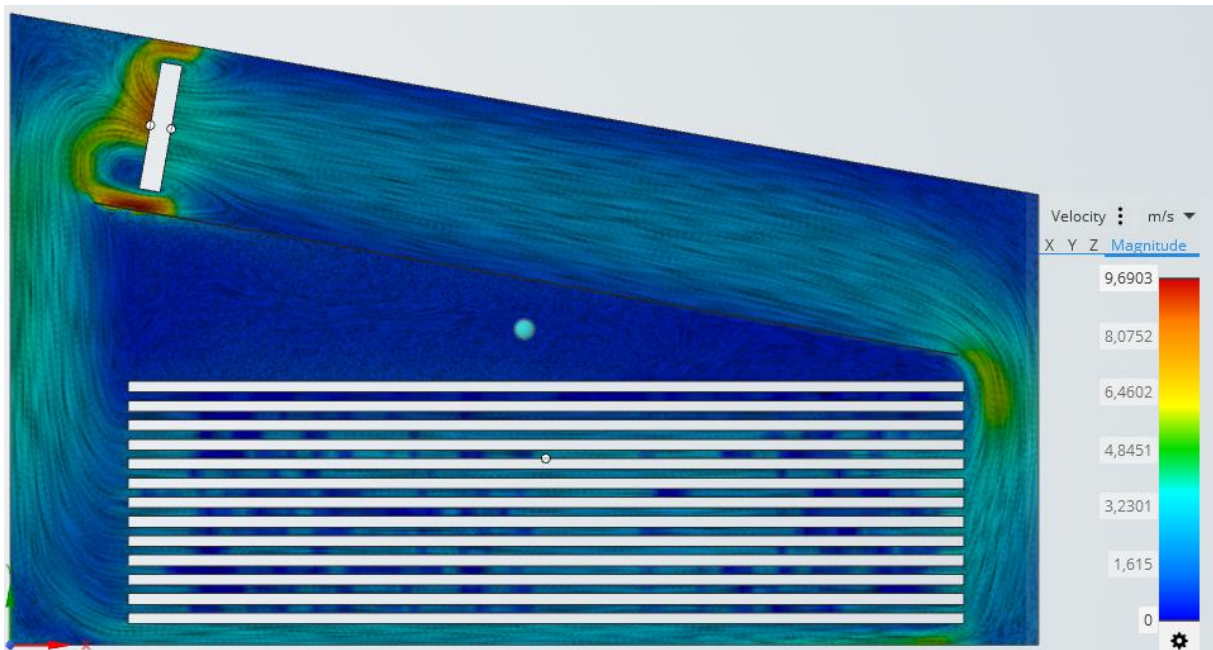
4.5. Diseño de detalle.

En el diseño de materialización se determinaron las principales dimensiones y formas de la cámara de secado híbrida mediante simulaciones, cálculos y otras consideraciones funcionales, dando solución al objetivo principal del proceso de diseño.

En cambio, en el diseño de detalle se deben considerar disposiciones geométricas que contribuyan a mejorar el proceso de diseño, en este caso garantizar la distribución uniforme de flujo de aire caliente en el interior de la cámara de secado.

En primer lugar, se recorre la posición de las pilas de madera hacia la derecha hasta llegar al tramo final del colector solar, esto se realiza con la finalidad de disminuir los vórtices de velocidad generados en la esquina superior derecha de la madera. Entonces, en esta posición se evalúan los cambios significativos mediante la simulación por el método de volúmenes finitos.

Figura 48. Simulación para el cambio de posición de las pilas de madera.

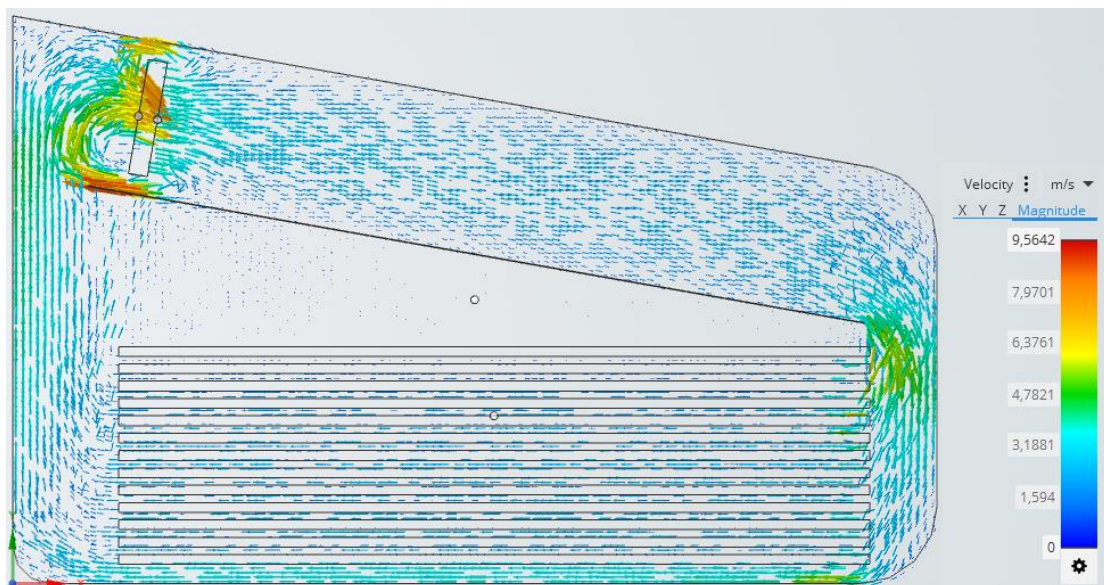


FUENTE: PINCAY DE LA ROSA JAIR RONALDO.

En la figura 39, se observa un flujo uniforme de aire caliente sobre la pila de madera, con la diferencia única de que los vórtices de velocidad en la esquina superior derecha de la pila se han neutralizado casi en su totalidad. Se puede apreciar que en ese punto el fluido fluye con normalidad por la pila de madera, solucionando los inconvenientes que presentaba en la disposición anterior.

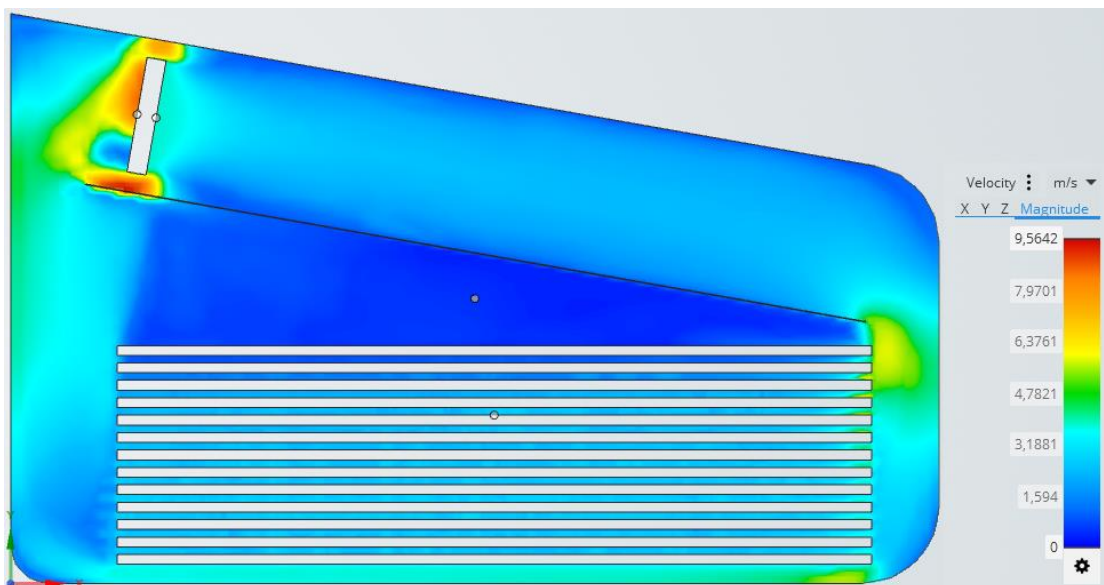
Además, en la figura 39 se puede observar en las esquinas internas de la cámara de secado que se generan pequeños modelos de turbulencia. Para ello, una de las mejoras técnicas que contribuyen a optimizar los modelos de turbulencia en el interior de la cámara, es el uso de deflectores de aire. Los deflectores se ubican en el interior del secador, principalmente en las esquinas superiores e inferiores, en este caso se ubican deflectores en las esquinas superior derecha y las dos esquinas inferiores.

Figura 49. Simulación del volumen de control para la cámara de secado con deflectores.



FUENTE: PINCAY DE LA ROSA JAIR RONALDO.

Figura 50. Deflectores usados para mejorar el desempeño del flujo interno de aire caliente.

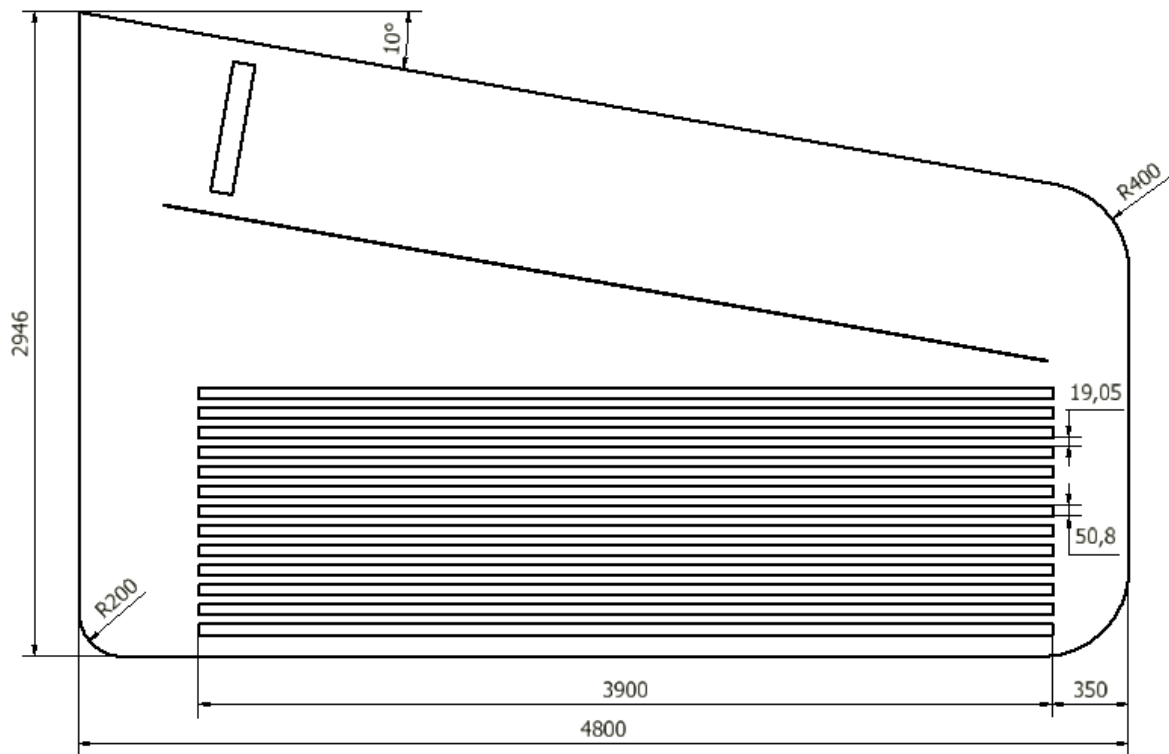


FUENTE: PINCAY DE LA ROSA JAIR RONALDO.

En la figura 40, se aprecia que los vectores de velocidad siguen la dirección uniforme hacia la pila de madera sin generar vórtices de velocidad en las esquinas. En la figura 41 se observa que con la aplicación de deflectores se anulan las zonas donde la velocidad del fluido disminuía a un valor aproximadamente igual a cero (observar esquinas de color azul en la figura 39).

Finalmente, tanto el cambio de posición de la pila de madera como el uso de deflectores en las aristas del volumen de control, fueron idóneos para obtener excelentes resultados que garanticen un flujo uniforme de aire caliente en el interior de la cámara de secado. En la figura 42, se indican las dimensiones modificadas del volumen interno de la cámara de secado.

Figura 51. Dimensiones modificadas de la cámara de secado.



FUENTE: PINCAY DE LA ROSA JAIR RONALDO.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones.

- La metodología del proceso de diseño de la ingeniería concurrente mediante la aplicación de la matriz QFD, se determinó las características técnicas de ingeniería de mayor relevancia en la investigación, siendo éstas las que se evaluaron en la etapa de materialización. El diseño de la cámara de secado seleccionado en la etapa de conceptualización contiene los siguientes componentes: colector solar, ventiladores ubicados en la parte del colector, caldera de biomasa, serpentines y ventoleras.
- Las dimensiones del diseño propuesto de la cámara de secado son de 3.2m de longitud, 4.8m de ancho y 2.1m de altura, se compone de una cubierta de vidrio y debajo de ella se encuentra ubicada la placa absorbadora (pintada de color negro mate) con una inclinación de 10°. El ventilador seleccionado es el modelo HCH/SEC-63-4T-1,5 de la empresa SODECA, se encuentra ubicado por encima del colector y permite mover un caudal máximo de $17000 \frac{m^3}{h}$ cada uno, aproximadamente. Las ventilas se ubican en lugares estratégicos para dejar ingresar aire fresco o expulsar aire húmedo según sea necesario.
- Mediante el modelo matemático propuesto para el balance de energías del sistema se determinó que el rendimiento o eficiencia del colector solar plano es del 32.35 % y la energía útil, la cual es usada en forma de calor para calentar el aire que circula en el interior, es de 1.47 kW al día, equivalente a 44 kW al mes y 530 kW de energía por año aproximadamente.
- Se propusieron cinco alternativas de diseño, donde las alternativas C, D y E se simularon en ANSYS Discovery Live mediante el modelado fluido dinámico, dando como resultado que la mejor solución era la configuración de apilado D. Por último, se consideró una disposición geométrica con deflectores en las esquinas superior derecha y las dos esquinas inferiores del secador, obteniéndose resultados favorables de un flujo más uniforme de aire evitando zonas de vórtices de velocidad.

5.2. Recomendaciones.

- Es recomendable que las alternativas de diseño elaboradas en la etapa de diseño conceptual mediante la estructura funcional o diagrama de funciones, se evalúen mediante métodos multicriterio ponderados.
- Se recomienda que para dimensionar la cámara de secado se considere la demanda de madera a secar en la empresa, y evaluar si es factible diseñar una sola cámara de secado o cámaras equivalentes para satisfacer el nivel de producción.
- Es recomendable efectuar un balance de energía en estado transitorio para determinar la temperatura de salida de aire del colector solar durante las horas del día.
- Debido a los recursos limitados de la versión estudiantil de ANSYS Discovery Live, se recomienda adecuar el mallado del volumen de control para no sobrepasar los nodos y elementos límites en la generación de malla, con ello se disminuye los tiempos de cálculo y evitar advertencias que no permitan ejecutar la simulación.

CAPÍTULO VI
BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía

- [1] J. K. Francis, «Ochroma pyramidale Cav. Balsa,» de *Silvics of Native and Exotic Trees of Puerto Rico and the Caribbean Islands*, Río Piedras, U.S. Department of Agriculture, 2000, pp. 371-376.
- [2] P. Parra, «La balsa, la apuesta del sector maderero,» *Gestión*, pp. 42-44, 2016.
- [3] Instituto Ecuatoriano de Normalización, Sistema de clasificación y calificación de madera aserrada proveniente de bosques húmedos tropicales, Quito: Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011.
- [4] Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, Estructuras de madera, Quito: Dirección de Comunicación Social, MIDUVI, 2014.
- [5] Proholz Austria, «Interempresas Media, S.L.U. - Grupo Nova Àgora,» 7 Febrero 2013. [En línea]. Available: <https://www.interempresas.net/Madera/Articulos/105399-Madera-aserrada-para-uso-estructural.html>. [Último acceso: 12 Diciembre 2021].
- [6] R. Choque Mamani, «Manual para el productor forestal: Como cubicamos nuestra madera,» Jatun Sach'a, La Paz, 2017.
- [7] Ministerio del Ambiente, 2016. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2QdaX5v>. [Último acceso: 4 Febrero 2021].
- [8] Capítulo 7: Estructuras de madera, Norma CPE INEN-NEC-SE-MD 26-7, 2015.
- [9] A. Carrillo, F. Garza, H. González, R. Foroughbakhch y V. Bustamante, «Tecnologías para la preservación de la madera y evaluación de la durabilidad,» de *Técnicas en el manejo sustentable de los recursos naturales*, Monterrey, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2014, pp. 122-141.
- [10] E. Hernández, «Material de construcción para hornos de secado de madera,» *Científica*, vol. 18, n° 4, pp. 141-145, 2014.

- [11] R. Mamani, «Diseño de un secador de madera aserrada orientado a las pequeñas y medianas empresas de el Alto,» tesis de grado, Univ. Mayor de San Andres, La Paz, 2015.
- [12] M. Sanz y R. Patiño, Manual práctico del operador de calderas industriales, Madrid: Paraninfo, 2014.
- [13] F. Sebastián, D. García y A. Rezeau, Energía de la biomasa II (Energías renovables), Zaragoza: Prensas de la Universidad de Zaragoza, 2010.
- [14] Altertec, «Secadores solares,» Altertec, [En línea]. Available: <http://altertec.com/secadores-solares/>. [Último acceso: 9 Enero 2021].
- [15] O. Herrera Bolaños, F. Ruiz Aquino, W. Santiago García y D. Sarmiento Bustos, «Secador solar: Una alternativa de bajo costo para secar madera aserrada en la Sierra Juárez, Oaxaca,» *Agroproductividad*, vol. 10, n° 9, pp. 84-89, 2017.
- [16] H. Ortega y J. Reyes, «Propuesta de diseño de un horno para secado de madera, dirigido a PYMES del sector madera mueble del Municipio de Managua,» tesis de grado, Univ. Nacional de Ingeniería, Managua, 2018.
- [17] P. Rufes, Energía solar térmica - Técnicas para su aprovechamiento, Barcelona: Marcombo, S.A., 2010.
- [18] P. Sarmiento, Energía solar en arquitectura y construcción, Santiago: RIL editores, 2007.
- [19] E. K. Vakkilainen, Steam generation from biomass: Construction and design of large boilers, Chennai: Butterworth-Heinemann, 2017.
- [20] Y. Cengel y A. Ghajar, Transferencia de calor y masa. Fundamentos y aplicaciones, México: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, 2011.
- [21] T. Bergman, A. Lavine, F. Incropera y D. Dewitt, Fundamentals of heat and mass transfer, Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- [22] D. Logan, A First Course in the Finite Element Method, Stamford, CT: Cengage Learning, 2012.

- [23] ANSYS, «Ansys Discovery: Next-Generation Product Design Software,» ANSYS, 2021. [En línea]. Available: <https://www.ansys.com/products/3d-design/ansys-discovery>. [Último acceso: 15 Enero 2021].
- [24] ESSS, «Ansys 3D design: Discovery Live,» ESSS, 2021. [En línea]. Available: <https://www.esss.co/es/ansys-simulacion-computacional/3d-design/discovery-live/>. [Último acceso: 15 Enero 2021].
- [25] J. Hendrickson, «Ansys Discovery Live: Real-Time Simulation Revolution,» *Ansys Advantage*, vol. XI, n° 3, pp. 50-53, 2017.
- [26] ESSS, «Ansys 3D design: Discovery AIM,» ESSS, 2021. [En línea]. Available: <https://www.esss.co/es/ansys-simulacion-computacional/3d-design/discovery-aim/>. [Último acceso: 21 Enero 2021].
- [27] S. Scampoli, «Introducing Ansys AIM: Simulation for Every Engineer,» *Ansys Advantage*, vol. IX, n° 3, pp. 46-49, 2015.
- [28] R. Contreras, «Análisis del uso de un secador solar para madera en la ciudad de Cuenca,» tesis de grado, Univ. de Cuenca, Cuenca, 2017.
- [29] P. De León, «Diseño de un secador para madera híbrido y automático con ventilación forzada para aplicación en proyectos de docencia, investigación y servicio de la facultad de ingeniería,» tesis de maestría, Univ. de San Carlos de Guatemala, 2009.
- [30] A. Rojas, «Balance de energía en un horno de secar madera,» *Tecnología Química*, vol. XXXVI, n° 1, pp. 14-26, 2016.
- [31] L. Aquino, J. Rodríguez, L. Méndez y S. Sandoval, «Evaluación de programas de secado para madera de chalamite (*Pinus pseudostrobus*),» *Madera y Bosques*, vol. XVI, n° 2, pp. 35-46, 2010.
- [32] F. Ignacio, «Diseño de un secador híbrido para madera aserrada,» tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional, Oaxaca, 2008.
- [33] J. Stjepandic, N. Wognum y W. Verhagen, *Concurrent Engineering in the 21st Century*, Alemania: Springer, 2015.

- [34] G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen y K. Grote, *Engineering Design A Systematic Approach*, Alemania: Springer, 2007.
- [35] C. Bryant, R. Stone y D. K. T. C. M. McAdams, «Concept generation from the functional basis of design,» de *International conference on engineering design*, Melbourne, 2005.
- [36] NPD SOLUTIONS, «Customer-Focused Development with QFD,» 2019. [En línea]. Available: <http://www.npd-solutions.com/qfd.html>. [Último acceso: 26 03 2021].
- [37] C. Riba, *Diseño concurrente*, Barcelona: Edicions UPC, 2002.
- [38] BOLFOR y S. Viscarra, «Guía Práctica para el Secado de la Madera en Hornos,» El País, Santa Cruz, 1998.
- [39] Wood-Mizer, «Introducción al secado en horno,» Wood-Mizer, 2020.
- [40] M. S. Fuentes, «Construcción y validación de un secador solar para madera aserrada,» *Revista Chapingo Serie de Ciencias Forestales y del Ambiente*, vol. 9, nº 2, pp. 171-176, 2003.
- [41] SODECA, «Catálogos de ventilación,» SODECA, 2021. [En línea]. Available: <https://www.sodeca.com/es/catalogs>. [Último acceso: 13 Marzo 2021].
- [42] C. Salas, R. Moya y R. Córdoba, «Diseño y construcción de un secador solar para madera,» *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, vol. 5, nº 14, pp. 30-55, 2008.
- [43] A. Koulibaly y J. González, «Modelación de un colector solar para calentamiento de aire,» *Ingeniería Energética*, vol. XXXVI, nº 3, pp. 282-293, 2015.
- [44] INAMHI, 2021. [En línea]. Available: <https://www.gob.ec/inamhi>. [Último acceso: 11 Mayo 2021].
- [45] INIAP, «Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.iniap.gob.ec/pruebav3/plan-estrategico-de-investigacion-y-desarrollo-tecnologico-del-iniap/>. [Último acceso: 12 Mayo 2021].

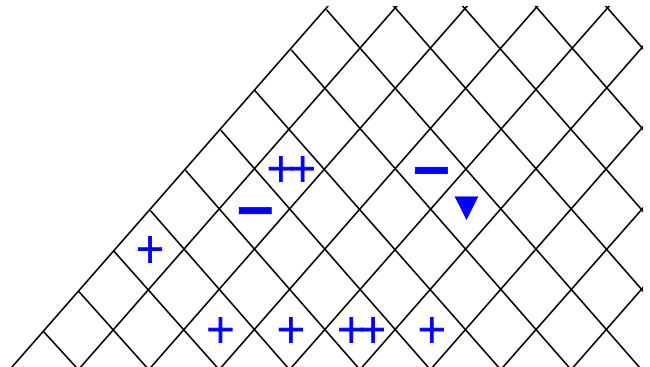
- [46] CONELEC-CIE, «Atlas solar del Ecuador con fines de generación eléctrica.,» Corporación para la Investigación Energética, Quito, 2008.
- [47] Canada.ca, «Government of Canada,» 30 Abril 2021. [En línea]. Available: <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-and-publications/tools/modelling-tools/retscreen/7465>. [Último acceso: 12 Mayo 2021].

CAPÍTULO VII

ANEXOS

Anexo 1. Casa de la calidad de la matriz QFD aplicada al proceso de diseño de la cámara de secado híbrida para madera de balsa.

Leyenda		
⊙	Relación fuerte	9
○	Relación moderada	3
△	Relación débil	1
++	Fuerte correlación positiva	
+	Correlación positiva	
-	Correlación negativa	
▼	Débil correlación negativa	
▼	El objetivo es minimizar	
▲	El objetivo es maximizar	
X	El objetivo es alcanzar el propósito	



Fila #	Valor máximo de relación en fila	Importancia relativa	Importancia (1 al 5)	Especificaciones del usuario	Columa #														
					1	2	3	4	5	6	7	8	9						
				Requerimientos técnicos de ingeniería															
				Dirección de mejora: Mínimo (▼), Máximo (▲), u Objetivo (X)	X	X	X	X	▼	▲	X	▼	▼						
					Elección del programa de secado														
					Colector solar														
					Caldera de vapor														
					Control automático de componentes														
					Velocidad de ventiladores														
					Forma interna del secador														
					Dimensiones del secador														
					Baja conductividad térmica del material aislante														
					Bajo número de componentes														
1	9	13,2	5	Bajo contenido de humedad de la madera <10%	⊙	○	○	○	○	○									
2	9	13,2	5	Rápido secado de la madera entre 4 a 10 días	⊙	○	○	○	○	○	○	○							
3	9	10,5	4	Aprovechar la energía solar		○					○	○							▲
4	9	10,5	4	Mantener el secado durante el día y la noche		○	○				○	○							▲
5	9	7,9	3	Fácil manejo				○											
6	9	13,2	5	Flujo interno uniforme del aire					○	○	○								
7	9	13,2	5	Capacidad para secar madera de 30k a 35k pies tablas		○	○				▲	○							
8	9	7,9	3	Evitar pérdidas de calor															○
9	9	5,3	2	Bajo costo del material aislante															○
10	9	5,3	2	Fácil construcción															○
				Valor límite u objetivo															
				Dificultad técnica (0=Fácil de lograr, 10=Extremadamente difícil)															
				Valor máximo de relación en columna	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
				Importancia	236,8	386,8	292,1	150,0	276,3	352,6	339,5	157,9	68,4						
				Importancia relativa	10,5	17,1	12,9	6,6	12,2	15,6	15,0	7,0	3,0						

Anexo 2. Humedad relativa ambiente y contenido de humedad de equilibrio de la madera para diferentes temperaturas del bulbo seco y depresiones del bulbo húmedo.

T °C	Humedad %	Diferencia Psicrométrica en °C																					
		1	1 1/2	2	2 1/2	3	3 1/2	4	4 1/2	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	22	25	28
5	H.R.	86	79	72	65	58	52	45	39	33	20	7											
	C.H.E.,	19	16	14	12	11	9.5	8.5	7.5	6.5	4.5	1.5											
15	H.R.	90	85	80	75	71	66	61	57	53	44	36	27	20	13								
	C.H.E.,	20.5	18	16	14.5	13	12	11	10.5	10	8	7	6	4.5	3								
25	H.R.	92	88	84	81	77	74	70	67	63	57	50	44	39	33	22	12						
	C.H.E.,	21.5	19.5	17.5	16	15	14	13	12	11.5	10	9	8	7.5	6.5	5	2.5						
35	H.R.	94	90	87	84	81	78	75	72	69	64	59	54	49	44	36	28	20	13	7			
	C.H.E.,	22	19.5	18	16.5	15.5	14.5	13.5	13	12	11	10	9.5	8.5	8	6.5	6	4	3	1.5			
40	H.R.	94	91	88	85	82	80	77	74	72	67	62	57	53	48	40	33	26	20	14	6		
	C.H.E.,	22	19.5	18	17	16	15	14	13	12.5	11.5	10.5	9.5	9	8	7	6	5	4	3	1.5		
45	H.R.	94	91	88	85	83	80	78	75	73	69	64	60	56	52	44	37	30	25	19	14		
	C.H.E.,	22	19.5	18	17	15.5	15	14	13.5	12.5	11.5	10.5	10	9	8	7	6.5	5.5	4.5	4	3		
50	H.R.	95	92	89	86	83	81	79	76	74	70	65	61	58	54	46	40	34	29	24	18	12	5
	C.H.E.,	22	19.5	18	16.5	15.5	15	14	13.5	12.5	11.5	10.5	10	9	8.5	7.5	6.5	5.5	5	4	3.5	2.5	1
55	H.R.	95	92	90	87	84	82	80	78	76	72	67	63	60	56	50	43	37	32	27	22	16	10
	C.H.E.,	21.5	19.5	18	16.5	15.5	14.5	13.5	13	12.5	11.5	10.5	10	9	8.5	7.5	6.5	6	5	4.5	4	3	2

Continuación del Anexo 2...

T °C	Humedad %	Diferencia Psicrométrica en °C																					
		1	1 1/2	2	2 1/2	3	3 1/2	4	4 1/2	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	22	25	28
60	H.R.	95	92	90	88	85	83	81	79	77	73	69	65	61	58	52	45	40	35	30	25	20	14
	C.H.E.,	21.5	19	17.5	16.5	15.5	14.5	13.5	13	12.5	11.5	10.5	10	9	8.5	7.5	7	6	5.5	4.5	4	3.5	2.5
65	H.R.	95	93	91	88	86	84	82	80	78	74	70	66	63	60	53	47	42	37	32	28	22	17
	C.H.E.,	21	19.5	17	16	15	14	13.5	13	12.5	11.5	10.5	10	9	8.5	7.5	7	6	5.5	5	4	3.5	3
70	H.R.	96	93	91	88	86	84	83	81	79	75	71	68	65	61	55	50	44	40	35	31	25	20
	C.H.E.,	20.5	18.5	17	15.5	15	14	13.5	13	12	11	10.5	9.5	9	8.5	7.5	7	6	5.5	5	4.5	3.5	3
75	H.R.	96	93	91	89	87	85	83	82	80	76	72	69	66	63	57	51	46	41	38	33	28	22
	C.H.E.,	20	18	16.5	15.5	14.5	14	13	12.5	12	11	10	9.5	9	8.5	7.5	6.5	6	5.5	5	4.5	3.5	3
80	H.R.	97	93	91	89	87	86	84	82	81	77	74	70	67	64	59	53	48	43	40	36	30	25
	C.H.E.,	19.5	17.5	16	15	14.5	13.5	13	12.5	12	11	10	9.5	8.5	8	7.5	6.5	6	5.5	5	4.5	4	3.5
85	H.R.	97	93	91	90	88	86	84	82	81	78	74	71	68	65	60	54	49	45	41	38	32	27
	C.H.E.,	19.5	17	16	15	14	13.5	12.5	12	11.5	10.5	10	9	8.5	8	7	6.5	6	5.5	5	4.5	4	3.5

T°C: es la temperatura de bulbo seco según la especie de madera.

HR: es la humedad relativa (%).

CHE: es el contenido de humedad de equilibrio (%).

Anexo 3. Programas de secado recomendados para diferentes especies de madera.

No.	Nombre común	Nombre científico	Peb ^a	Dad ^{aa} 12%	Horario ^{aaa}	
					1 ^a	2 ^a
1	Ajpa, Jorori	<i>Swartzia</i> sp.	0,64	---	(T2-C2)	(T2-C1)
2	Amargo	<i>Simarouba amara</i>	0,36	---	Fuerte	-----
3	Amarillo	<i>Aspidosperma</i> sp.	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</i> spp.	0,42	0,50	(T10-D4S)	(T8-D3S)
9	Copaibo	<i>Copaifera</i> sp.	0,60	0,70	MODERADO	-----
10	Cuchi	<i>Astronium unundeuva</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>Ptylostylon</i> sp.	0,79	0,95	(T2-B2)	-----
14	Gabún, Sangre de toro	<i>Virola boliviensis</i>	0,39	0,48	(T3-C2)	(T3-C1)
15	Guapi	<i>Guarea</i> sp.	0,58	---	(T6-D2)	(T3-D1)
16	Guayabochi	<i>Calycophyllum spruceanum</i>	0,75	0,91	(T2-C2)	(T2-C1)
17	Isigo	<i>Protium</i> sp.	0,54	---	(T3-C2)	(T3-C1)
18	Japunaqui	<i>Cordia</i> sp.	0,66	---	(T6-D2)	(T3-D1)
19	Jichituriqui, Gabetillo	<i>Aspidosperma pyriforme</i>	0,73	0,89	(T6-D2)	(T3-D1)
20	Laurel amarillo	<i>Nectandra</i> sp.	0,45	0,53	SUAVE	-----
21	Mapajo	<i>Ceiba pentandra</i>	0,51	0,62	(T10-D5S)	(T8-D4S)
22	Mara	<i>Swietenia macrophylla</i>	0,43	0,54	(T6-D4)	(T3-D3)
23	Mara macho	<i>Cedrelinga catenaeformis</i>	0,46	0,57	MODERADO	-----
24	Momoqui	<i>Caesalpinia peltophoroides</i>	0,89	1,05	(T3-C2)	(T3-C1)
25	Mora	<i>Chlorophora tinctoria</i>	0,81	0,96	MODERADO	-----
26	Morado del Beni	<i>Peltogyne porphyrocardia</i>	0,86	---	(T6-D2)	(T3-D1)
27	Morado Chiquitos	<i>Peltogyne</i> sp.	0,84	0,99	(T6-D2)	(T3-D1)
28	Mururé, Mascajo	<i>Clarisia racemosa</i>	0,61	0,70	SUAVE	-----
29	Nogal	<i>Juglans australis</i>	0,50	0,59	(T6-D4)	(T3-D3)
30	Nui, ojoso colorado	<i>Pseudolmedia laevigata</i>	0,76	0,90	MODERADO	-----
31	Ochoó, Solimán	<i>Hura crepitans</i>	0,44	0,52	(T6-D2)	(T3-D1)

Continuación del Anexo 3...

No.	Nombre común	Nombre científico	Peb*	Dad** 12%	Horario***	
					1"	2"
32	Palo blanco, Verdolaga	<i>Calycophyllum multiflorum</i>	0,64	0,78	(T2-C2)	(T2-C1)
33	Palo maria	<i>Calophyllum brasiliense</i>	0,55	0,66	(T2-D4)	(T2-D3)
34	Paquió	<i>Hymenaea courbaril</i>	0,77	---	(T3-C2)	(T3-C1)
35	Picana negra	<i>Cordia spp.</i>	0,66	---	(T6-D2)	(T3-D1)
36	Quebracho colorado	<i>Schinopsis quebracho-colorado</i>	1,04	1,22	(T1-B1)	----
37	Quina quina	<i>Myroxylon peruiferum</i>	0,80	0,97	SUAVE	----
38	Sirari	<i>Ormosia sp.</i>	0,82	0,99	MODERADO	----
39	Soto	<i>Schinopsis spp.</i>	1,07	1,27	(T1-B1)	----
40	Sujo	<i>Sterculia striata</i>	0,45	0,52	(T2-D4)	(T2-D3)
41	Tajibo, Lapacho	<i>Tabebuia spp.</i>	0,85	0,98	(T3-C1)	----
42	Tarara colorada	<i>Platymiscium sp.</i>	0,65	0,73	(T2-B2)	----
43	Tejeyequé	<i>Centrolobium tomentosum</i>	0,58	0,70	(T6-D2)	(T3-D1)
44	Trompillo	<i>Guarea trichilioides</i>	0,58	---	(T6-D2)	(T3-D1)
45	Verdolago	<i>Terminalia amazonia</i>	0,66	0,80	(T3-C2)	(T3-C1)
46	Wewey	<i>Clarisia racemosa</i>	0,61	0,70	SUAVE	----
47	Yesquero	<i>Cariniana sp.</i>	0,56	0,68	(T3-D2)	(T3-D1)

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

** Densidad de madera seca con el 12% de contenido de humedad (g/cm³).

*** Programas de secado sugeridos para maderas de 1 y 2 pulgadas de espesor.

Anexo 4. Programas generales de temperatura para madera.

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

* Contenido de humedad al comenzar el paso.

Anexo 5. Programas generales de depresiones psicrométricas para madera.

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

* Contenido de humedad al comenzar el paso.

Anexo 6. Características técnicas para ventiladores HCH/SEC.

HCH/SEC



Ventiladores diseñados con la mejor tecnología y experiencia, para soportar temperaturas de trabajo de hasta 90°C en secaderos de madera y cerámica



Ventilador:

- Aro soporte en chapa de acero o inoxidable AISI-304 según versión.
- Hélice en fundición de aluminio.
- Dirección aire motor-hélice.

Motor versión 90°C 100%HR:

- Motores clases H, con rodamientos a bolas especialmente diseñados para altas temperatura, protección IP-55.
- Motores con ventilación externa.
- Trifásicos 230/400V 50Hz (hasta 3kW) y 400/690V-50Hz (potencias superiores a 3kW).
- Temperatura de trabajo: -10°C+ 90°C y 100% humedad relativa.

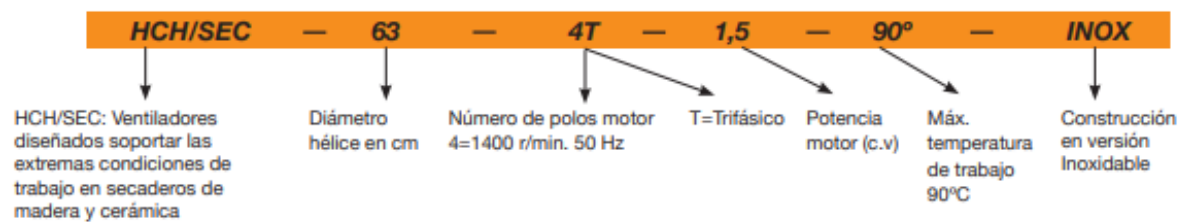
Acabado:

- Anticorrosivo en resina de poliéster polimerizada a 190 °C, previo desengrase con tratamiento nanotecnológico libre de fosfatos.
- Versión INOX acabado granallado.

Bajo demanda:

- Cualquier modelo serie HCH, puede convertirse en HCH/SEC.
- Dirección aire hélice-motor.
- Hélices reversibles 100%.
- Bobinados especiales para diferentes tensiones.
- Aro soporte en AISI-316.

Código de pedido



Características técnicas

Modelo	Velocidad (r/min)	Intensidad máx admisible (A)		Potencia instalada (kW)	Caudal máximo (m³/h)	Nivel presión sonora dB(A)	Peso aprox. (Kg)
		230V	400V				
HCH/SEC-63-4T-1,5	1450	5,2	3	1,1	17000	74	39
HCH/SEC-63-4T-2	1450	6,41	3,7	1,5	18900	75	42
HCH/SEC-63-4T-3	1450	8,49	4,9	2,2	22100	76	50
HCH/SEC-63-4T-4	1450	11,78	6,8	3	25400	77	52
HCH/SEC-71-4T-1,5	1450	5,2	3	1,1	19750	78	45
HCH/SEC-71-4T-2	1450	6,41	3,7	1,5	21100	79	47
HCH/SEC-71-4T-3	1450	8,49	4,9	2,2	23950	81	56
HCH/SEC-71-4T-4	1450	11,78	6,8	3	29400	82	58
HCH/SEC-80-4T-3	1450	8,49	4,9	2,2	28000	82	73
HCH/SEC-80-4T-4	1450	11,78	6,8	3	32700	83	75
HCH/SEC-80-4T-5,5	1450	15,24	8,8	4	37200	84	80

Características acústicas

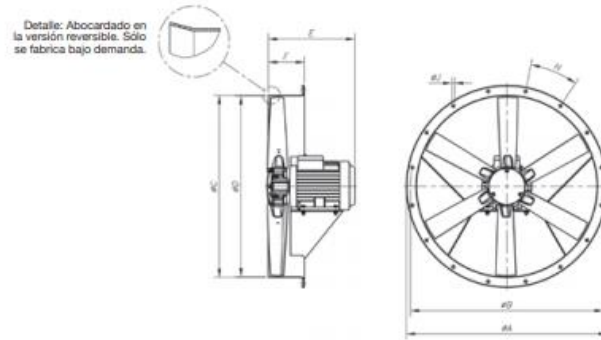
Los valores indicados, se determinan mediante medidas de nivel de presión y potencia sonora en dB(A) obtenidas en campo libre a una distancia equivalente a dos veces la envergadura del ventilador más el diámetro de la hélice, con un mínimo de 1,5 mts.

Espectro de potencia sonora Lw(A) en dB(A) banda de frecuencia en [Hz]

Modelo	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	Modelo	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
HCH/SEC-63-4T-1,5	51	71	79	84	86	83	76	65	HCH/SEC-71-4T-3	58	78	86	91	93	90	83	72
HCH/SEC-63-4T-2	52	72	80	85	87	84	77	66	HCH/SEC-71-4T-4	59	79	87	92	94	91	84	73
HCH/SEC-63-4T-3	53	73	81	86	88	85	78	67	HCH/SEC-80-4T-3	59	79	87	92	94	91	84	73
HCH/SEC-63-4T-4	54	74	82	87	89	86	79	68	HCH/SEC-80-4T-4	60	80	88	93	95	92	85	74
HCH/SEC-71-4T-1,5	55	75	83	88	90	87	80	69	HCH/SEC-80-4T-5,5	61	81	89	94	96	93	86	75
HCH/SEC-71-4T-2	56	76	84	89	91	88	81	70									

Continuación del Anexo 6...

Dimensiones mm



Modelo	ØA	ØB	ØC	ØD	1,5	2	3	4	5	F	ØJ	N
HCH/SEC-63-4	730	690	645	640	305	330	360	360	-	150	12	12 X 30°
HCH/SEC-71-4	810	770	715	710	302	322	367	367	-	150	12	16 X 22°30'
HCH/SEC-80-4	900	860	805	800	-	-	375	375	390	180	12	16 X 22°30'