

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Adecuación de secador solar tipo invernadero para el secado de granos

INGE-2407

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingenieros en Mecánica

Presentado por:

John Patricio Arias Garces

Juan Antonio Tulcán Alvarez

Guayaquil - Ecuador

Año: 2023

Dedicatoria

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a Dios, a mi familia, y en particular a mis hermanos mayores, por apoyarme y creer en mí. También estoy enormemente agradecido con la familia Sánchez quienes generosamente me ofrecieron alojamiento y me brindaron un apoyo incondicional para superar los desafíos de la carrera.

John Patricio Arias Garces

El presente proyecto lo dedico a mis padres que son un pilar fundamental en mi vida, que me apoyaron en toda mi carrera universitaria y siempre creyeron en mí. A mi tía abuela Norma y mis tías que me brindaron su sabiduría, y en especial a mi tía Verónica que su pérdida fue una gran tristeza en mi vida de la cual guardo sus recuerdos en mi corazón.

Juan Antonio Tulcán Alvarez.

Agradecimientos

Nuestro más sincero agradecimiento a la ESPOL por la oportunidad educativa brindada. Nuestro reconocimiento especial se dirige a la Dra. Emérita Delgado cuya guía experta y paciencia fueron cruciales.

Apreciamos a los profesores por su enseñanza invaluable y a nuestros amigos y compañeros por el apoyo incondicional

Declaración Expresa

Nosotros John Patricio Arias Garcés y Juan Antonio Tulcán Alvarez acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores. La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 6 de febrero del 2024.


John Patricio Arias

Garcés


Juan Antonio Tulcán

Alvarez

Evaluadores

Emérita Delgado Plaza, PhD

PROFESORA DE MATERIA

TUTORA DEL PROYECTO

Resumen

En el presente proyecto integrador, se busca reducir la humedad en granos utilizados en la alimentación mediante la adaptación de un secador tipo invernadero. Con el respaldo del software Solidworks, se analiza el comportamiento del flujo de aire en términos de dinámica de fluidos y transferencia de calor. Se optimiza la distribución del flujo de aire, asegurando una temperatura por debajo de los 60°C para condiciones óptimas. Inicialmente, se acopla y recopila información del equipo existente, identificando un mal funcionamiento en el secador, por lo que se buscó nuevos diseños que permitan los objetivos planteados donde dicha solución que cumplía con los requerimientos del cliente fue la utilización de paredes Venturi, baffles, colector y una pared difusora. Como resultado se consiguió una distribución uniforme del aire con una velocidad promedio de 0.7 m/s y una temperatura homogénea en toda la cámara. En conclusión, la simulación proporciona una aproximación que optimiza el comportamiento del flujo y temperatura del secador.

Palabras Clave: Humedad, Distribución de aire, Simulación, Comportamiento del fluido.

Abstract

In this integrative project, the aim is to reduce the humidity in grains used in food by adapting a greenhouse-type dryer. Supported by SolidWorks software, the airflow behavior is analyzed in terms of fluid dynamics and heat transfer. The distribution of air flow is optimized, ensuring a temperature below 60°C for optimal conditions. Initially, information from the existing equipment is coupled and collected, identifying a malfunction in the dryer, so new designs were sought that would allow the stated objectives where the solution that met the client's requirements was the use of Venturi walls, baffles, collector, and a diffuser wall. As a result, a uniform distribution of air was achieved with an average speed of 0.7 m/s and a homogeneous temperature throughout the chamber. In conclusion, the simulation provides an approach that optimizes the flow and temperature behavior of the dryer.

Keywords: *Humidity, Air distribution, Simulation, Fluid behavior.*

Índice general

Evaluadores	IV
Resumen.....	V
Abstract	VI
Índice general	VII
Abreviaturas	X
Simbología	XI
Índice de figuras.....	XII
Índice de tablas.....	XIII
Índice de planos.....	XV
Capítulo 1	1
1.1 Introducción	2
1.2 Descripción del problema	3
1.3 Justificación del problema	4
1.4 Objetivos.....	4
1.4.1 <i>Objetivo general</i>	4
1.4.2 <i>Objetivos específicos</i>	5
1.5 Marco teórico	5
1.5.1 <i>Tipos de secadoras</i>	5
1.5.2 <i>Secador Solar tipo invernadero</i>	6
1.5.3 <i>Métodos de Secado</i>	6
1.5.4 <i>Mecanismos de transferencia de calor</i>	7
1.5.5 <i>Parámetros y análisis de secado</i>	7
Capítulo 2.....	13
2.1 Metodología	14
2.1.2 <i>Criterios de diseño</i>	15

2.1.3 Comparación de pares.....	18
2.1.4 Patentes de diseño	19
2.1.5 Metodología de cálculo	20
2.2 Diseño conceptual.....	25
2.2.1 Software de simulación.....	25
2.2.2 Modelado computacional para determinar la trayectoria de fluido	26
Capítulo 3.....	33
3.1 Datos experimentales	34
3.2 Resultados y análisis	37
3.2.1 Resultados del modelo original	37
3.2.2 Resultados del modelo con baffle	40
3.2.3 Resultados del modelo con dos paredes a la entrada y salida.....	41
3.2.4 Resultados del modelo con elevación de pared.....	43
3.2.5 Resultados del modelo con dos entradas de aire en la parte superior de las puertas	44
3.2.5 Resultados del modelo con cuatro entradas de aire en la parte posterior.....	46
3.2.7 Resultados del modelo con pared difusora.....	48
3.2.8 Resultados del modelo con Venturi en la entrada, colector y pared difusora	50
3.2.9 Resultados del modelo Venturi en la entrada, colector y pared difusora superior.....	52
3.2.10 Matriz de decisión	54
3.3 Análisis de resultados de la solución	55
3.4 Planos constructivos	58
3.5 Diseño de la solución del secador tipo invernadero.....	58
3.5.1 Construcción del diseño	59
3.6 Validación del diseño final.....	65
3.6.1 Análisis de la validación.....	67
3.7 Análisis de costos	68
3.7.1 Costos de materia prima y consumibles	69

3.7.2 <i>Costos de mano de obra y mecanizado</i>	70
3.7.3 <i>Costo total del proyecto</i>	72
Capítulo 4.....	73
4.1 Conclusiones y recomendaciones	74
4.1.1 <i>Conclusiones</i>	74
4.1.2 <i>Recomendaciones</i>	75
Referencias.....	77
Apéndices.....	79

Abreviaturas

ESPOL Escuela Superior Politécnica del Litoral

ASTM American Society for Testing and Materials

GLP Gas Licuado de Petróleo

CFD Dinámica de Fluidos Computacional

CDTS Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable

CNEL Corporación Nacional de Electricidad

Simbología

m	Metro
s	Segundo
h	Hora
m/s	Metro por segundo
V	Voltio
mV	Milivoltio
°C	Grado centígrado
K	Kelvin
W	Watt
J	Joule
kJ	Kilojoule
kg	Kilogramo
mm	Milímetro

Índice de figuras

Figura 1. <i>Isoterma del contenido de humedad de equilibrio de productos alimenticios</i>	8
Figura 2. <i>Impacto de la actividad del agua a distintas reacciones de deterioro</i>	9
Figura 3. <i>Curva de secado de los granos</i>	10
Figura 4. <i>Curva de velocidad de velocidad de secado</i>	11
Figura 5. <i>Diagrama de flujo</i>	14
Figura 6. <i>Patente del muro Trombe aplicando captación de calor solar y refrigeración por radiación de forma integral</i>	20
Figura 7. <i>Secador inicial para la simulación en CFD</i>	25
Figura 8. <i>Parámetros de operación y tipo de análisis</i>	28
Figura 9. <i>Condiciones iniciales de la simulación</i>	28
Figura 10. <i>Configuración de la simulación</i>	29
Figura 11. <i>Configuración de las propiedades del material</i>	29
Figura 12. <i>Condiciones de contorno en la entrada de flujo</i>	30
Figura 13. <i>Condiciones de acabado</i>	30
Figura 14. <i>Configuración de refinamiento</i>	31
Figura 15. <i>Configuración de resolución</i>	31
Figura 16. <i>Configuración de guardado</i>	32
Figura 17. <i>Secador solar tipo invernadero sin modificaciones</i>	34
Figura 18. <i>Temperatura vs tiempo en puntos críticos de la cámara</i>	36
Figura 19. <i>Diseño del secador original</i>	38
Figura 20. <i>Velocidades en la cámara de secado mediante del diseño original</i>	39
Figura 21. <i>Líneas de trayectoria de la velocidad</i>	39
Figura 22. <i>Diseño del secador con baffle</i>	40
Figura 23. <i>Velocidades en la camara de secado mediante del modelo con baffle</i>	41
Figura 24. <i>Diseño del secador con dos paredes a la entrada y salida</i>	42
Figura 25. <i>Velocidades en la cámara de secado mediante del modelo con dos paredes a la entrada y salida</i>	42
Figura 26. <i>Diseño del secador con elevación de pared</i>	43
Figura 27. <i>Velocidades en la cámara de secado mediante del modelo con elevación del colector</i>	44
Figura 28. <i>Diseño del secador con dos entradas de aire en la parte superior y parte posterior</i>	45

Figura 29. <i>Velocidades en la cámara de secado del modelo con dos entradas de aire en la parte superior y parte posterior</i>	45
Figura 30. <i>Temperaturas en la cámara de secado mediante del modelo con dos entradas de aire en la parte superior y parte posterior</i>	46
Figura 31. <i>Diseño del secador con cuatro entradas de aire en la parte posterior</i>	47
Figura 32. <i>Velocidades en la cámara de secado mediante del modelo con cuatro entradas de aire en la parte posterior</i>	47
Figura 33. <i>Temperaturas en la cámara de secado mediante cut plot del modelo con cuatro entradas de aire en la parte posterior</i>	48
Figura 34. <i>Diseño del secador con colector difusor</i>	49
Figura 35. <i>Velocidades en la cámara de secado mediante cut plot del modelo colector difusor</i>	49
Figura 36. <i>Diseño del secador con modelo con Venturi en la entrada, colector y pared difusora</i>	51
Figura 37. <i>Velocidades en la cámara de secado mediante del modelo con Venturi en la entrada, colector y pared difusora</i>	52
Figura 38. <i>Diseño del secador con Venturi en la entrada, colector y pared difusora superior</i>	53
Figura 39. <i>Velocidades en la cámara de secado mediante del modelo del secador con Venturi en la entrada, colector y pared difusoras superior</i>	53
Figura 40. <i>Puntos de estudio en la cámara de secado del modelo final</i>	56
Figura 41. <i>Gráfica de velocidad vs tiempo de la simulación de la solución</i>	56
Figura 42. <i>Gráfica de temperatura vs tiempo de la simulación de la solución</i>	57
Figura 43. <i>Extracción de las partes del diseño original</i>	59
Figura 44. <i>Retirada de láminas de acero y material aislante</i>	60
Figura 45. <i>Ampliación de la entrada de flujo para el ventilador</i>	60
Figura 46. <i>Fabricación de la cubierta del ventilador</i>	61
Figura 47. <i>Ubicación del piso del secador</i>	62
Figura 48. <i>Instalación del techo inferior</i>	62
Figura 49. <i>Ensamble de las paredes Venturi</i>	63
Figura 50. <i>Instalación del baffle curvo inferior y superior</i>	64
Figura 51. <i>Instalación de los divisores de flujo</i>	64
Figura 52. <i>Instalación de los paneles perforados</i>	65

Índice de tablas

Tabla 1. <i>Criterios de diseño para la comparación de pares</i>	15
Tabla 2. <i>Elementos existentes del secador solar tipo invernadero</i>	16
Tabla 3. <i>Rango y criterio de la comparación de pares y matriz de decisión</i>	18
Tabla 4. <i>Comparación de pares</i>	18
Tabla 5. <i>Matriz de patentes</i>	19
Tabla 6. <i>Ecuaciones principales</i>	21
Tabla 7. <i>Parámetros conocidos para el desarrollo del cálculo</i>	22
Tabla 8. <i>Medición de temperatura en puntos críticos</i>	35
Tabla 9. <i>Adquisición de datos de radiación solar</i>	37
Tabla 10. <i>Matriz de desición</i>	54
Tabla 11. <i>BIAS y RMSE de la velocidad</i>	66
Tabla 12. <i>BIAS y RMSE de la temperatura</i>	66
Tabla 13. <i>Reducción de humedad en puntos críticos</i>	66
Tabla 14. <i>Componentes y materiales otorgados por el cliente</i>	69
Tabla 15. <i>Materia prima y consumibles</i>	70
Tabla 16. <i>Costos de mano de obra y mecanizado</i>	71
Tabla 17. <i>Trabajos externos</i>	72
Tabla 18. <i>Costo total del proyecto</i>	72

Índice de planos

- PLANO 1 Ensamble de secador tipo invernadero
- PLANO 2 Pared de entrada de flujo
- PLANO 3 Pared de puertas
- PLANO 4 Piso del secador
- PLANO 5 Techo intermedio
- PLANO 6 Techo superior
- PLANO 7 Pared Venturi
- PLANO 8 Baffle curvo superior
- PLANO 9 Divisor de flujo
- PLANO 10 Malla metálica.
- PLANO 11 Panel perforado superior
- PLANO 12 Pared lateral derecha
- PLANO 13 Resistencia
- PLANO 14 Pared lateral izquierda
- PLANO 15 Baffle curvo inferior

Capítulo 1

1.1 Introducción

Es importante tener en cuenta que existe la temperatura física límite de los granos de 54 °C; esto significa que el aire de secamiento puede llegar a niveles de 65 °C debido a las pérdidas de calor que suceden durante el secamiento, pero por arriba de esta temperatura el grano está sufriendo y su calidad empieza a deteriorarse. (Lizarazo, 1983)

Los granos cuando llegan a la etapa de maduración poseen su máximo contenido de materia seca, por lo que se recomienda cosechar y posteriormente secar los granos para obtener mayor índice de materia seca, disminución de producción por depredadores, mayor porcentaje de germinación y evitar la contaminación de plagas en la cosecha. (Marques, 1993)

La humedad se refiere a la cantidad de agua en el interior de los granos, es decir, que la cantidad de humedad de los granos dependen del medio y las condiciones climáticas, de forma general al cosechar los granos el valor de humedad oscila entre 40% a 55% de humedad y el valor óptimo de humedad en la costa ecuatoriana (humedad relativa de 70%) es de 13 a 15% para ser almacenados y exista un equilibrio térmico. (Marques, 1993)

Para este proyecto el sistema de secado pretende ser un diseño de secado con flujo de aire adecuado en la cámara tal que la velocidad de secado sea la más efectiva y que el flujo deba distribuirse de manera más efectiva en todas las zonas de la cámara que garantice el secado uniforme de los granos que se encuentran distribuidos en varias bandejas. El sentido del flujo de aire caliente se conducirá con un diseño inspirado en paredes trombe o el uso de dispositivos de ventilación y ductos adecuados para distribuir uniformemente y controlado. (Freire Sánchez & León Maisincho, 2023)

La ventaja de este secador innovador es dar a conocer el uso efectivo de energía renovable y la operación del secador dará beneficios para la educación en temas de transferencia de calor y de fabricación, además de ser un modelo de servicio para sectores agrícolas.

Para lograr con los propósitos del equipo se trata de llegar a un diseño efectivo, que trabaje a temperaturas que entre en el rango de 50 a 60 grados Celsius.

Para el análisis del diseño se pretende utilizar recursos computacionales CFD (Dinámica de Fluidos Computacional), para encontrar puntos críticos y optimizar la distribución del flujo en la cámara de secado.

Los recursos de análisis de elementos finitos también ayudan a aproximar la solución a un problema, o también vulnerabilidades en los diseños, o productos en un entorno virtual, para con ello predecir el comportamiento de los materiales y de los fluidos. Los elementos principales en la dinámica de fluidos computacional son; la discretización del flujo continuo, la discretización de las ecuaciones de movimiento en cada nodo, para con ello hallar los valores de las variables en todos los nodos. (Freire Sánchez & León Maisincho, 2023)

Existen etapas para analizar en CFD los diseños como, cálculos previos la cual consiste formular el problema y plantear las ecuaciones que lo gobiernan, establecer las condiciones de contorno, la generación de una malla de volúmenes finitos. Seguido, las soluciones de las ecuaciones son resueltas por los recursos computacionales y tomara el tiempo necesario dando la solución numérica de las ecuaciones que gobierna el problema. Y, Por último, el análisis de los resultados obtenidos de la solución de las ecuaciones se corresponde con el valor de las variables de campo en cada punto de la malla.

1.2 Descripción del problema

El Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable (CDTS) en el año 2020 construyo un secador solar tipo invernadero lo cual, no tuvo el resultado deseado durante las pruebas de secado de granos, además, al transcurso de la pandemia el secador quedo fuera de funcionamiento. Siendo de importancia para el área del CDTS por motivo de investigación y

desarrollo de innovación hacia las comunidades agrícolas que necesitan tecnologías sostenibles y replicables para el secado de sus productos.

A partir de los antes mencionado se habilitará el secador considerando los problemas detallados a continuación: Tecnología existente (solar), uniformidad del aire caliente de al menos un 80% de secado del producto, consumo de energía y recirculación del aire de salida del secado y temperatura de operación 50°C y 60°C con el propósito de ser utilizado de forma pedagógico, debido a que el diseño actual posee deficiencias en la distribución de aire caliente, lo que provoca que solo una parte de los granos se encuentren en las condiciones deseadas.

1.3 Justificación del problema

El secado en el sector agrícola es el proceso con mayor consumo energético para el secado de granos, donde la principal fuente de consumo de energía se da a través del gas licuado de petróleo (GLP) y electricidad, siendo el GLP más utilizado para dicho proceso, con un precio de 0.107 \$/kg. Así que la implementación de tecnologías incentivará a prácticas agrícolas sostenibles, eficientes, y aportaría a la disminución de costos de producción de los granos.

En el caso particular de Ecuador, existe poca información sobre el consumo de energía en los procesos de secado. Donde no existe una valoración entre la tecnología de secado existente y su asociación con los diseños y construcción de secadores en plantas agroindustriales o centros de acopio de cereales en la costa ecuatoriana. Además, la mayoría de los secadores del sector agroindustrial se ubican en las provincias de Guayas y Los Ríos. (Delgado, 2020)

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Habilitar un secador solar tipo invernadero del CDTs que permita la deshidratación de 60 kg de granos para ello se utilizará conceptos fundamentales de transferencia de calor y mecánica de fluido.

1.4.2 Objetivos específicos

- 1 Rediseñar el secador tipo invernadero para la optimización de la distribución uniforme de calor a una temperatura de 50°C a 60 °C, discriminando alternativas tecnológicas renovables.
- 2 Simular el comportamiento del flujo de aire del secador utilizando software de dinámica computacional de fluidos.
- 3 Validar el equipo seleccionando a partir de los datos teóricos y simulados.

1.5 Marco teórico

1.5.1 Tipos de secadoras

En la actualidad existe varios tipos de diseño de secadores clasificadas por flujo, cantidad y tiempo, entre ellas tenemos

- Secadoras de flujo continuo; Verticales, de Cascada y Horizontales.
- Secadoras por tipo de flujo; Flujo cruzado y flujo mixto.
- Silos; Flujo contracorriente, flujo cruzado.

En la actualidad, las maquinas secadoras son muy variadas dependiendo los propósitos, estas se clasifican en secadoras de flujo continuo como tipo torre o verticales, estas secadoras mantienen un flujo mixto o cruzado, contracorriente o concurrente, también existen de tipo cascada, de forma horizontal, de tandas, o silos, los cuales trabajan con flujo cruzado o flujo mixto de recirculación o estáticas.

Por otro lado, las secadoras de flujo concurrente el grano y el aire de secado fluyen en la misma dirección y sentido, estas secadoras permiten se incrementen la velocidad de secado sin sobrecalentar el grano y dañar sus propiedades alimenticias. Así también las secadoras cascadas son equipos de poca inclinación ocupan un área superficial mayor que las secadoras tipo torre y tienen mayor potencia absorbida conforme a otras secadoras. (DIOS, 1996)

1.5.2 Secador Solar tipo invernadero

Los secadores solares tipo invernadero son considerablemente utilizados por el sector agrícola para deshidratar los alimentos y reducir su porcentaje de humedad. Usualmente, sus paredes son de policarbonato y su estructura es de acero con entradas de aire, en la cual el material ingresa a la cámara de secado en bandejas de capa fina, donde la radiación circula por las paredes para calentar el aire, que a su vez pasa circula pasa por el producto disipando la humedad en este. Y finalmente, el aire con mayor porcentaje de humedad se extrae al exterior del secador. (Garduño, 2020).

1.5.3 Métodos de Secado

1.5.3.1 Secado natural

Es una técnica que consiste en dejar expuesto el grano a las condiciones ambientales principalmente la energía solar y a las corrientes del aire, cuando el producto se encuentre listo ser cosechado, donde este método es comúnmente usado por los agricultores de los países en vía de desarrollo, porque se puede realizar en patios de concreto. De ello, resulta que la ventaja es que no gastos en combustibles y solo en la infraestructura del patio, en la cual todavía cabe considerar las desventajas como la absoluta dependencia de las condiciones climáticas durante todo el año, la contaminación cruzada por animales y personas.

1.5.3.2 Secado artificial

Este concepto nace de la imperativa necesidad de satisfacer la creciente demanda de producción en plazos reducidos, independientemente de las condiciones meteorológicas. El sistema se basa en una cámara de secado que alberga una variedad de granos, respaldada por un potente ventilador que garantiza una circulación eficiente del aire alrededor de los granos. Sin embargo, el aumento de la temperatura se logra mediante la quema de combustibles fósiles o gas

licuado de petróleo (GLP), lo que conlleva considerables costos tanto en términos de producción como de consumo energético. (Marques, 1993)

1.5.4 Mecanismos de transferencia de calor

El secador tipo invernadero existen la interacción entre diferentes cuerpos que produce una transferencia de calor por conducción, convección y radiación.

1.5.4.1 Transferencia por conducción

Es la energía que se transmite por la colisión entre partículas de distintos cuerpos a diferentes temperaturas, de tal manera que en cada choque las partículas ceden su energía cinética a las partículas que interactúan, sin que exista transporte de masa. (Francisco J. Barrera-Ríos, 2021)

1.5.4.2 Transferencia por convección

Es el mecanismo de transferencia de calor de característica de los fluidos, donde se produce transporte de energía y masa entre los fluidos, sea por la diferencia de densidades ocasionadas por las diferentes temperaturas, y forzada cuando la materia es obligada a fluir por el ventilador a la cámara de secado. (Moreno, 2013)

1.5.4.3 Transferencia por radiación

La transferencia de calor es mediante ondas electromagnéticas entre superficies que se encuentra a distintas temperaturas, donde el transporte de energía se propaga a la velocidad de la luz sin la necesidad de un medio, es decir, al vacío. (Francisco J. Barrera-Ríos, 2021)

1.5.5 Parámetros y análisis de secado

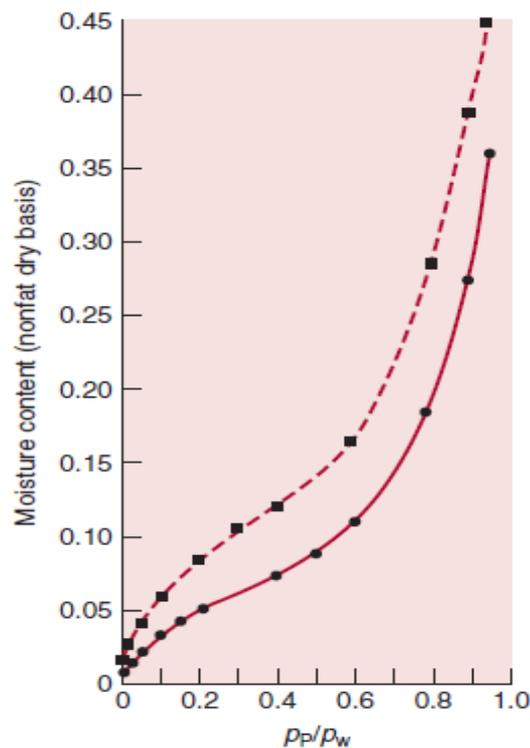
Para la eliminación de la humedad en los productos alimenticios de forma eficiente, los diseños de sistemas de secado deben considerar los diversos procesos y mecanismos como la estructura física definida, por la influencia de la estructura del producto en el movimiento de la humedad. (Heldman, 2014)

1.5.5.1 Actividad del agua

Es un parámetro importante de secado para el análisis de estabilidad de almacenamiento. Después de lo mencionado anteriormente, definimos que la actividad del agua es la humedad relativa de equilibrio del producto. (Heldman, 2014)

Figura 1

Isoterma del contenido de humedad de equilibrio de productos alimenticios

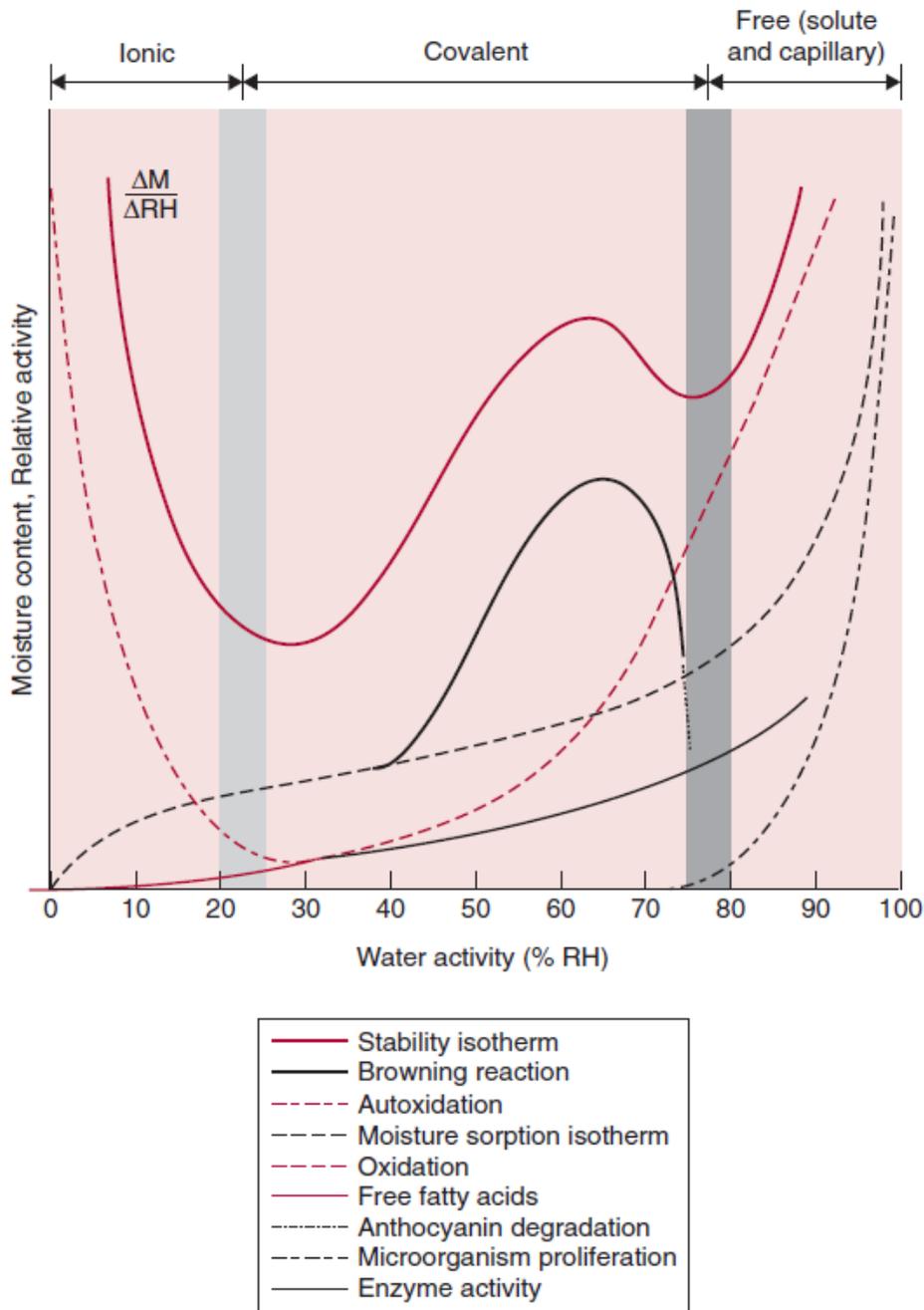


Fuente: Paul Singh, R. (2014). Introduction to Food Engineering [Figura]

La figura 1 presenta la curva de contenido de humedad común para los alimentos secos, donde la isoterma de desorción es la línea segmentada, y la isoterma de adsorción es la línea continua. A esto se añade, que los valores de estabilidad de almacenamiento de la actividad del agua a diferentes deterioros se detallan en la figura 2

Figura 2

Impacto de la actividad del agua a distintas reacciones de deterioro



Fuente Paul Singh, R. (2014). Introduction to Food Engineering [Figura]

1.5.5.2 Difusión de humedad

Consiste en el transporte de humedad por la difusión del vapor de agua y/o agua líquida por medio de la estructura del producto, por lo que el movimiento de humedad producirá a la evaporación del agua,

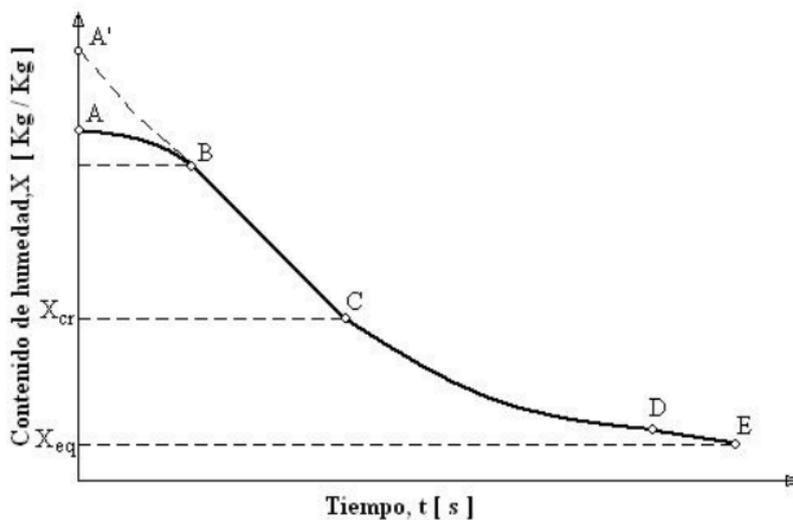
donde dicho movimiento de flujo de masa es función del gradiente de presión de vapor, masa de vapor de agua en el aire, la temperatura y la distancia para el movimiento del vapor de agua en la estructura del producto, donde la expulsión de humedad en el grano depender se basa en la transferencia de calor y masa por convección en la superficie. (Heldman, 2014)

1.5.5.3 Curva secado y velocidad de secado

La curva de secado indica el contenido de humedad de un producto a través del tiempo. En la figura 3, en el tramo A-B muestra un cambio de humedad. Al finalizar este periodo la gráfica se aproxima a una función lineal, donde la velocidad de secado es constante hasta el punto crítico C, a partir de este punto la gráfica empieza a cambiar su tendencia y formar una asíntota en el valor mínimo de humedad para que no se alteren las propiedades del grano. (Heldman, 2014)

Figura 3

Curva de secado de los granos



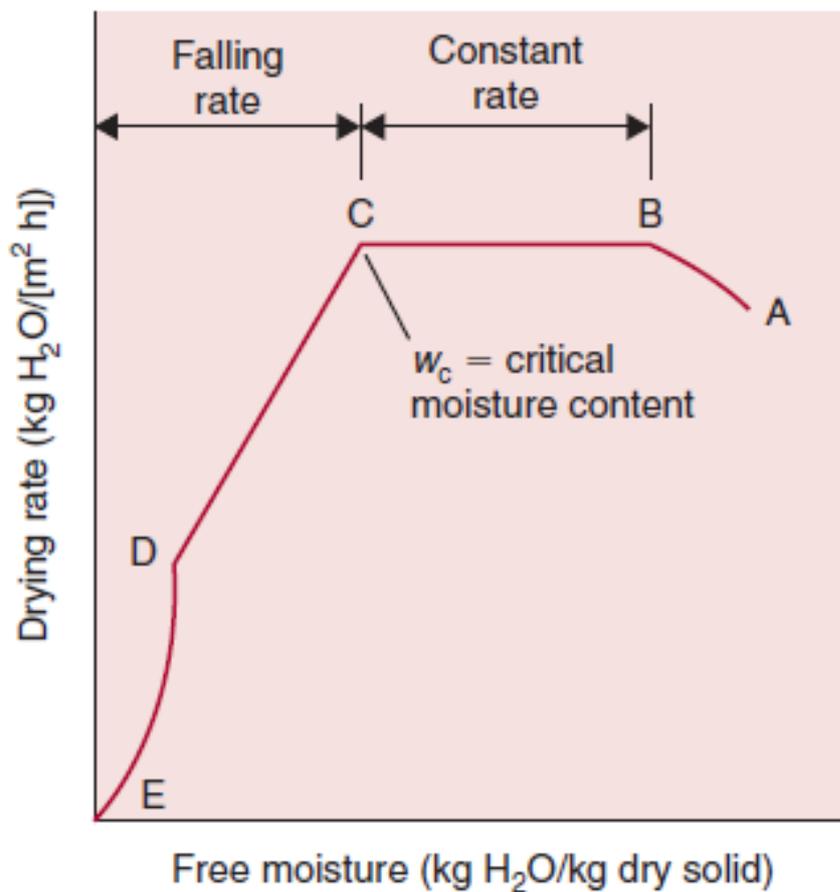
Fuente: Paul Singh, R. (2014). Introduction to Food Engineering [Figura]

La eliminación del contenido de agua de la mayoría de los productos alimenticios se rige a la figura 4. El tramo A-B indica la eliminación inicial de la humedad cuando existe un incremento de temperatura. El siguiente tramo B-C se produce una disminución significativa de la humedad a una velocidad y temperatura

constantes. Después de alcanzar el punto crítico de contenido de humedad (punto C), la velocidad decrece induciendo una disminución en la tasa de eliminación de humedad y conseguir el menor contenido de humedad en el grano. (Heldman, 2014)

Figura 4.

Curva de velocidad de velocidad de secado



Fuente: Paul Singh, R. (2014). Introduction to Food Engineering [Figura]

1.5.5.4 Transferencia de calor y masa

Con base en lo mencionado anteriormente, la eliminación de humedad en el grano involucra la transferencia de masa y calor. La transferencia de calor sucede dentro de la estructura del producto, y se asocia con el gradiente de temperatura entre la superficie del producto y la superficie del agua en algún lugar dentro del producto. La transferencia de calor y masa se genera a nivel molecular, estando la transferencia de calor establecida por la conductividad térmica del grano, aunque, la transferencia de masa es limitada por

la difusión molecular del vapor de agua en el aire. Donde la transferencia de masa y calor ocurre simultáneamente por los procesos convectivos. (Heldman, 2014)

Capítulo 2

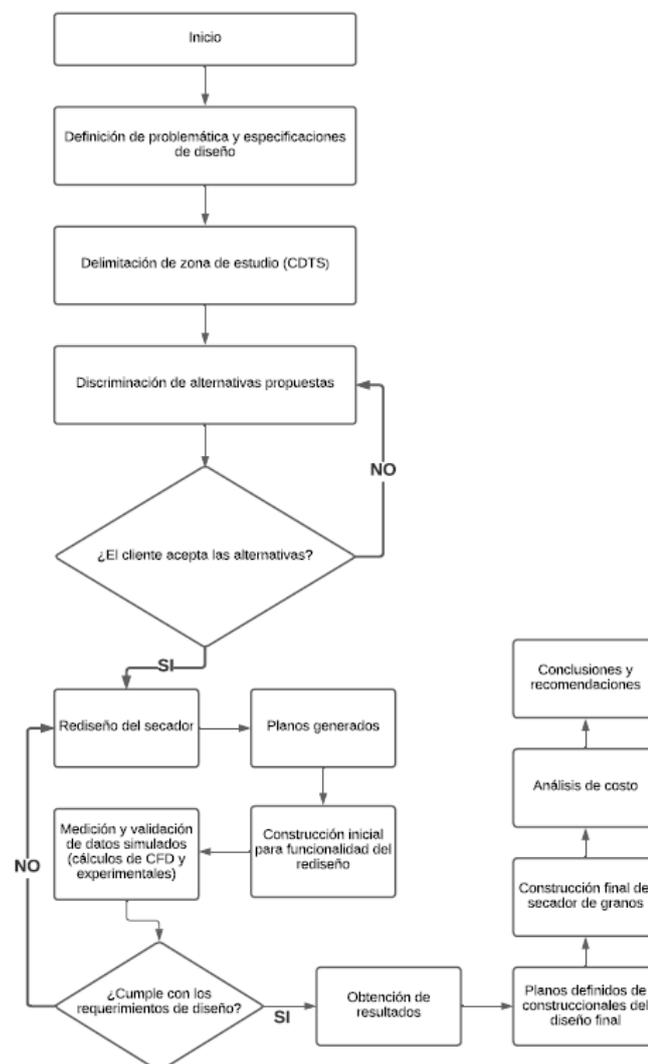
2.1 Metodología

2.1.1 Metodología de diseño

En el siguiente capítulo, se especificaron los procesos a seguir para el desarrollo del proyecto con un diagrama de flujo como se muestra en la figura 5, para la mejor obtención de la adecuación del secador solar tipo invernadero. Para ello, nos basamos en la metodología de diseño ingenieril que consiste en las etapas: definición del problema, identificación de necesidades, conceptualización, análisis de factibilidad y producción o aceptación.

Figura 5

Diagrama de flujo



2.1.2 Criterios de diseño

Para encontrar la solución efectiva y satisfactoria para el proyecto se deben considerar las siguientes pautas del cliente para que el resultado cumpla con las necesidades del cliente, por ende, se realizó la tabla 1 que menciona los criterios de diseño más importantes con descripción que explica el objetivo de cada criterio.

Tabla 1

Criterios de diseño para la comparación de pares

Criterio de selección	Detalle
Eficiencia térmica	Flujo y distribución uniforme de aire caliente en toda la cámara de secado. Además, de la colocación de baffles, diseño y distancia entre bandejas.
Consumo energético	Consumo de energía accesible mediante la adaptación de tecnología existente como colectores y muro Trombe. También, se encuentra inmiscuido el tiempo de secado de los granos.
Capacidad de secado	El diseño se establece para una capacidad de carga de 60 kg, con humedades iniciales entre 40% a 55%. Se necesita una reducción de agua del 10% al 15% de humedad.
Mantenimiento	Reemplazo de las paredes de policarbonato debido a la exposición a la luz ultravioleta, impactos y envejecimiento natural.
Temperatura	Temperatura de operación en 50°C y 60°C

Además, para el diseño del secador solar tipo invernadero se utilizaron las piezas de CDTS en la construcción del equipo anexos en la tabla 2.

Tabla 2

Elementos existentes del secador solar tipo invernadero

Elemento	Detalle	Foto
Pared de ventilación	Es la parte posterior del secador de acero inoxidable con aislamiento térmico donde se encuentran los ventiladores, sistema de control, resistencias térmicas y el extractor.	
Paredes de laterales	Son dos paredes de policarbonato con una estructura de acero al carbono con una inclinación de 10 grados en la parte superior de cada una.	

Puertas

Dos puertas de acero inoxidable con aislamiento térmico y en su parte superior es de policarbonato con una estructura de acero en dicha parte.

**Resistencias térmicas**

Resistencias en serpentín de 4180 W.

**Ventiladores**

Dos ventiladores que poseen una velocidad de 4.5 m/s



2.1.3 Comparación de pares

Después de analizar las especificaciones proporcionadas por el cliente, se recurrió a la matriz de comparación de pares. Este método se emplea para evaluar los diversos criterios de diseño entre sí, con el objetivo de establecer un orden jerárquico que vaya desde el más importante hasta el menos relevante. De esta manera, se busca proponer alternativas de solución basadas en la tabla 3 que indica las puntuaciones para la comparación de pares y la tabla 4 muestra las ponderaciones de los criterios.

Tabla 3. Rango y criterio de la comparación de pares y matriz de decisión

Rango	1-3
Criterio	1: Menos importante
	2: Medianamente importante
	3: Más importante

Tabla 4. Comparación de pares

Criterios de selección	Eficiencia térmica	Consumo energético	Capacidad de secado	Mantenimiento	Temperatura	Calificación	Peso
Eficiencia térmica	----	2	3	1	3	9	0.26
Consumo energético	2	---	1	1	2	6	0.18
Capacidad de secado	1	1	---	1	2	5	0.15
Mantenimiento	1	2	1	---	1	5	0.15
Temperatura	2	2	3	2	---	9	0.26
Total						34	1

2.1.4 Patentes de diseño

Dado que el diseño del secador solar tipo invernadero es innovador por la incorporación de tecnologías existentes y el aprovechamiento de la radiación solar.

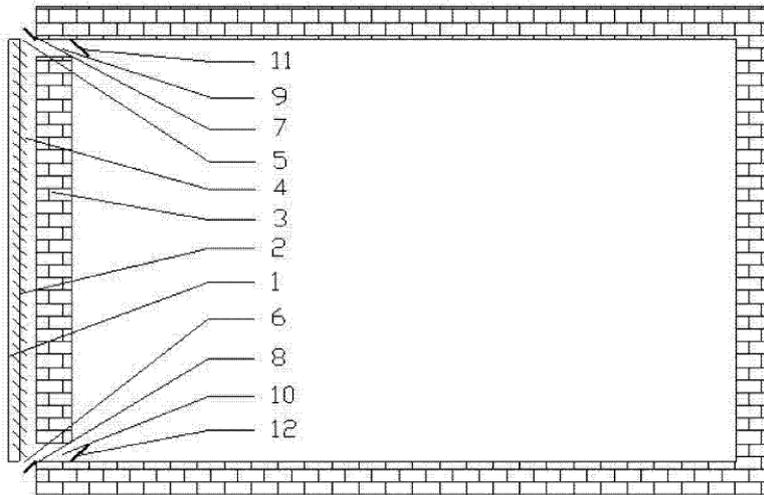
Tabla 5

Matriz de patentes

Nombre de la patente	Código	Año	País	Resumen	Similitud con el diseño	Novedad del diseño
Muro Trombe aplicando captación de calor solar y refrigeración por radiación de forma integral	CN2103790244A	2016	China	El muro Trombe comprende una placa transparente, un captador y acumulador de calor con aberturas de ventilación en la parte superior e inferior. La placa transparente es de un material de alta transmitancia	Fachada del muro Trombe con paredes transparentes	Captador negro para absorber la mayor cantidad de radiación y calentar el aire seco en la cámara de secado

Figura 6

Patente del muro Trombe aplicando captación de calor solar y refrigeración por radiación de forma integral



Fuente: Pei Gang (2014). Oficina Estatal de Propiedad Intelectual de la República Popular China [Figura]

2.1.5 Metodología de cálculo

Para el diseño se usó como fuente de calor, resistencias eléctricas de $Q = 4000 W$ cuyo poder convectivo es eficiente para calentar el flujo de aire de entrada y la Absorción de Radiación Solar que permite una ganancia o por lo menos evita pérdidas de calor por parte de las paredes y techos del policarbonato, cuyo material solo reduce la transmisión luz y calor en un 7% en paneles transparentes según fabricantes locales como DIPAC.

Por otro lado, el método de cálculo para el secado que se utilizó, son las ecuaciones de balance de energía y masa visualizadas en la tabla 6 con el uso de la carta psicométrica anexada en la sección de apéndice, dado que en el sistema existe un intercambio de flujo del gas caliente con la superficie de los granos donde una parte evapora la humedad y la otra es acumulada, todo este proceso estará limitado por el calor de vaporización de la temperatura de la superficie del producto. (Puertas, 2005).

Tabla 6*Ecuaciones principales*

Nombre	Ecuación
Consumo de aire seco	$\dot{m}_a = \frac{V_T}{H_{ac} - H_{wb}} \quad (2.1)$
Velocidad total de evaporación	$V_T = W_w * \left(\frac{X_{wb1} - X_{wb2}}{1 - X_{wb2}} \right) \quad (2.2)$
Energía total por hora de operación	$Q_T = \dot{m}_a (h_1 - h_2) \quad (2.3)$
Coefficiente convectivo	$h_i = 0.0204 (v_a * d_{a,c} * 3600)^{0,8} \quad (2.4)$
Calor latente de vaporización	$l_w = \frac{R}{M_A} [6547,1 - 4,23 (T + 273,16)] \quad (2.5)$
Tiempo de secado	$t = \frac{W_s l_w (X_{wb1} - X_{wb2})}{A_b N_b h_i (T_{a,c} - T_s)} \quad (2.6)$

A partir de la tabla 6 se muestran las variables implicadas en cada ecuación, ya que son datos conocidos y asumidos para calcular el calor total para reducir la humedad en los granos.

Tabla 7*Parámetros conocidos para el desarrollo del cálculo*

Nombre	Simbología	Valor
Humedad inicial del grano	X_{wb1}	0.55
Humedad final del grano	X_{wb2}	0.15
Humedad absoluta a la temperatura de bulbo seco del aire caliente	H_{ac}	$0.025 \frac{kg \text{ de agua}}{kg \text{ de aire seco}}$
Humedad absoluta a la temperatura de bulbo húmedo	H_{wb}	$0.016 \frac{kg \text{ de agua}}{kg \text{ de aire seco}}$
Área de las bandejas	A_b	$0.29 m^2$
Masa seca	W_s	$27 kg$
Masa húmeda	W_w	$33 kg$
Temperatura de aire caliente	$T_{a,c}$	$50^\circ C$
Temperatura de la superficie	T_s	$30^\circ C$
Número de bandejas	N_b	60
Constante de los gases	R	$8314 \frac{J}{kmol * K}$
Peso molecular del agua	M_A	$18 \frac{kg}{kmol}$
Densidad del aire caliente	ρ_{ac}	$1.245 \frac{kg}{m^3}$
Entalpía de bulbo seco	h_1	$92 \frac{kJ}{kg \text{ de aire seco}}$
Entalpía de bulbo húmedo	h_2	$65 \frac{kJ}{kg \text{ de aire seco}}$

Para calcular la energía total por hora de operación del secador, primero se calculó la velocidad total de vaporización con la ecuación 2.2 conociendo la humedad inicial, humedad final y la masa húmeda de los granos, tal como se indica en la tabla 7.

$$V_T = W_w * \left(\frac{X_{wb1} - X_{wb2}}{1 - X_{wb2}} \right)$$

$$V_T = 33 \text{ kg} * \left(\frac{0.55 - 0.15}{1 - 0.15} \right)$$

$$V_T = 15.53 \frac{\text{kg de agua}}{\text{h}}$$

Luego, se determinó el consumo de aire seco con la ecuación 2.1 que depende de humedad absoluta a la temperatura de bulbo seco del aire caliente y temperatura de bulbo húmedo como se muestra en la tabla 7.

$$\dot{m}_a = \frac{V_T}{H_{ac} - H_{wb}}$$

$$\dot{m}_a = \frac{15.53 \frac{\text{kg de agua}}{\text{h}}}{(0.025 - 0.016) \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de aire seco}}}$$

$$\dot{m}_a = 1725.56 \frac{\text{kg de aire seco}}{\text{h}}$$

Finalmente, con la ecuación 2.3 se encontró la energía total que necesita el secador para reducir la humedad del grano con la entalpía de bulbo seco del aire (55% de humedad relativa a una temperatura de 30 grados Celsius) y la entalpía de bulbo húmedo (15% de humedad relativa a una temperatura de 50 grados Celsius), cuyos valores se indican en la tabla 7.

$$Q_T = \dot{m}_a (h_1 - h_2)$$

$$Q_T = 1725.56 \frac{\text{kg de aire seco}}{\text{h}} (92 - 65) \frac{\text{kJ}}{\text{kg de aire seco}}$$

$$Q_T = 46590.12 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} = 12941.7 \text{ W}$$

Para el cálculo del tiempo de secado, se necesitó determinar el calor latente de vaporización del agua con la ecuación 2.5, a una temperatura de 22 grados Celsius con el peso molecular del agua y la constante de los gases.

$$l_w = \frac{R}{M_A} [6547,1 - 4,23 (T + 273,16)]$$

$$l_w = \frac{8314 \frac{J}{\text{kmol} * K}}{18 \frac{kg}{\text{kmol}}} [6547,1 - 4,23 (22 + 273,16)]$$

$$l_w = 2447.35 \frac{kJ}{kg * K}$$

Como los secadores su principal mecanismo de transferencia es por convección se encontró dicho coeficiente con la ecuación 2.4 para velocidades de aire que oscilan de 0.9 a 4.6 metros por segundo.

$$h_i = 0.0204 (v_a * d_{a,c} * 3600)^{0,8}$$

$$h_i = 0.0204 \left(3.5 \frac{m}{s} * 1.09 \frac{kg}{m^3} * 3600 \right)^{0,8}$$

$$h_i = 39.73 \frac{W}{m^2 * K}$$

Después de calcular el calor latente de vaporización, coeficiente de convectivo y con los valores del peso seco, área de las bandejas, numero de bandejas, temperatura del aire caliente y temperatura superficial del grano se determinó tiempo necesario del secado para 60 kg de granos.

$$t = \frac{W_s l_w (X_{wb1} - X_{wb2})}{A_b N_b h_i (T_{a,c} - T_s)}$$

$$t = \frac{60 kg \left(2447.35 \frac{kJ}{kg * K} \right) (0.55 - 0.15)}{0.29 m^2 (60) \left(39.73 \frac{W}{m^2 * K} \right) (50^\circ C - 30^\circ C)}$$

$$t = 4.25 h$$

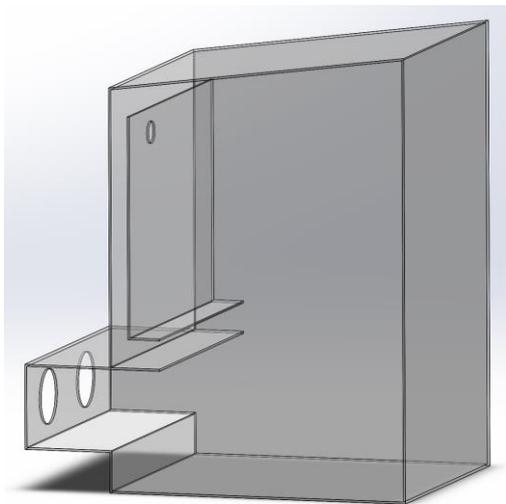
En la sección de apéndice D se encuentra anexados los costos de producción de un secador que funciona con GLP y nuestro equipo, además de una comparación general. Además de cálculos de perdidas de calor por conducción en paredes. Cabe mencionar que estos datos fueron evaluados a un tiempo específico, ya que todos los parámetros dependen de las condiciones ambientales, tanto para calidad de aire como la absorción por radiación.

2.2 Diseño conceptual

En el secador solar tipo invernadero se consideró un análisis de carga térmica total, distribución de flujo de aire y temperatura cuyo diseño original o inicial se emplea un muro Trombe para calentar el aire. Posee una pared de ventilación de acero inoxidable con aislante térmico donde se encuentran las entradas de flujo, muro Trombe y la salida de aire, paredes y techo de policarbonato para ayudar a conservar el calor y puertas de acero inoxidable con aislante térmico. Figura 7.

Figura 7

Secador inicial para la simulación en CFD



2.2.1 Software de simulación

Para encontrar la solución de apropiada de nuestra problemática se utilizó el método de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), específicamente el software Wizard de SolidWorks

en la versión estudiantil, que nos permite simular de forma rápida y sencilla el comportamiento del fluido en laminar, turbulento y transiente de los diseños prediciendo el rendimiento.

(Corporation, 2012)

2.2.2 Modelado computacional para determinar la trayectoria de fluido

Para encontrar la solución apropiada, fue importante realizar los parámetros que estaría sometido el diseño, material de construcción y dimensiones de este, es importante destacar que la simulación fue ejecutada al vacío. Con todo ello, desarrollamos los siguientes pasos en el programa Wizard de SolidWorks:

- Elaboración de piezas y seguido el ensamble de estas
- Creación de tapas de entrada y salida de fluido
- Seleccionar los métodos de transferencia de calor conducción y radiación, donde la última se coloca en dirección -1 en el eje 'y'. Así mismo, la simulación trabaja en transiente en un tiempo de 2h30 con un paso de tiempo de 60 segundos. Además, de colocar la dirección de la gravedad y el análisis de flujo interno como se refleja en la figura 8.
- Elegir el fluido de trabajo (aire) y el material del sólido para que el programa coloque su coeficiente de transferencia de calor. Después, especificar la temperatura de trabajo de 35 °C como se visualiza en la figura 9.
- Una vez establecidos los parámetros de operación en el secador, el programa arroja un dominio computacional o volumen de control que engloba todo el espacio donde se aplicarán las ecuaciones y parámetros previamente seleccionados, tal como se presenta en la figura 10.
- Posteriormente, se procede a elegir las caras en las cuales el fluido interactúa con las superficies sólidas, definiendo la temperatura de trabajo y humedad a la cual está relacionada el fluido de entrada. También, con la figura 11 se especifican las propiedades

de los materiales que componen el secador, junto con sus propiedades físicas para la conducción térmica.

- Se configuran las condiciones de frontera, para la entrada de fluido, la salida de fluido y otras condiciones de frontera que resultan útiles para variar y diferenciar las simulaciones posteriores. Al inicio se simuló con entrada de flujo caliente a 50 °C a 3.5 m/s medido previamente con un flujómetro del ventilador seleccionado y una salida a presión y temperatura ambientales, después se probó con una convección de calor por parte una pared de calor como fuente y finalmente se modeló con resistencias de 4000 W como generador de calor y siendo como un análisis más aproximado a la realidad. Se asume todos los fenómenos posibles que se crea dentro del análisis. Figura 12.
- Se verifica el control de cálculos (calculation control options), el cual definimos los parámetros de medida y como la simulación es en transitorio ajustamos el tiempo de análisis. Figura 13.
- En la opción 'refinement' se elige un refinamiento de nivel 3 reflejado en la figura 14.
- En la figura 15 comprobamos un paso de tiempo de 60 segundos o como en realidad se tomarán en práctica de 600 segundos.
- Guardamos los ajustes del programa como una nueva evaluación (Figura 16).
- Finalmente, presionamos 'OK' y corremos la simulación con la opción 'Run'.

Figura 8

Parámetros de operación y tipo de análisis

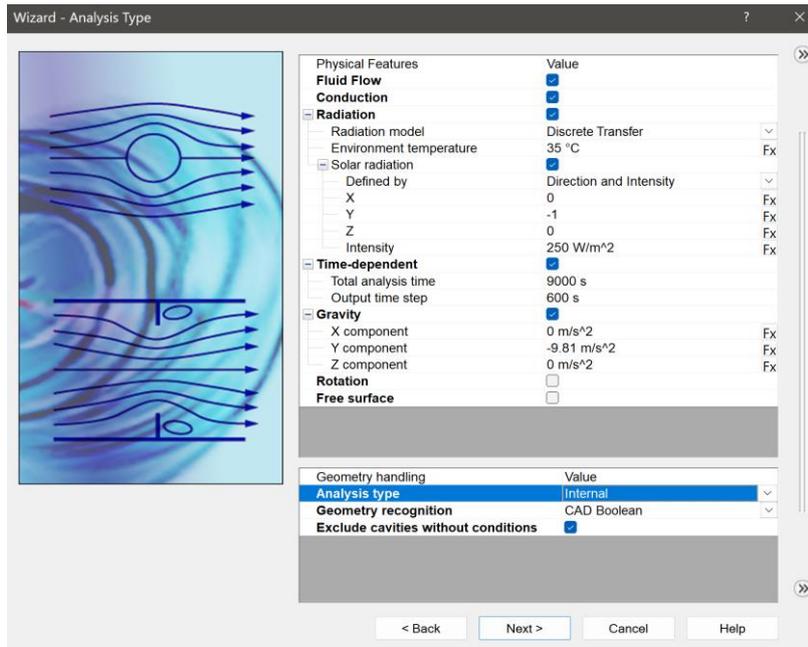


Figura 9

Condiciones iniciales de la simulación

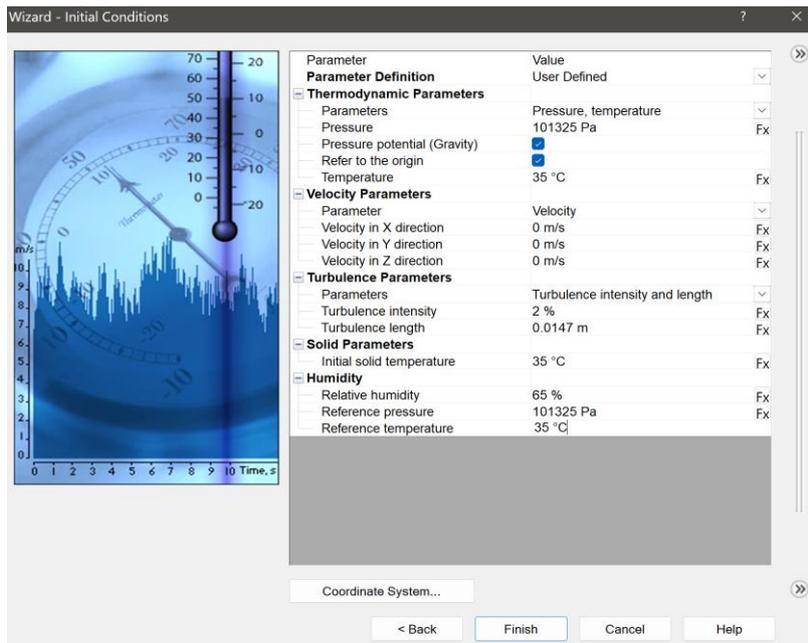


Figura 10

Configuración de la simulación

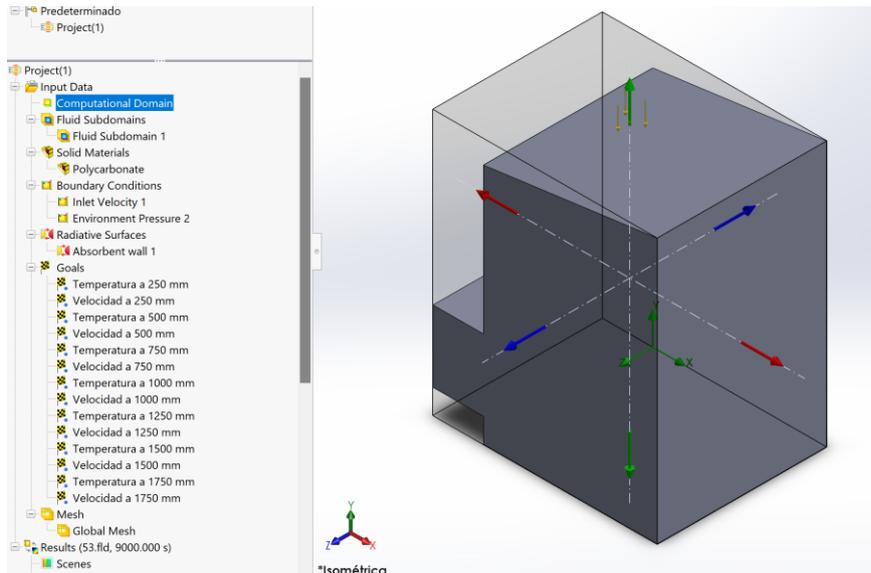


Figura 11

Configuración de las propiedades del material

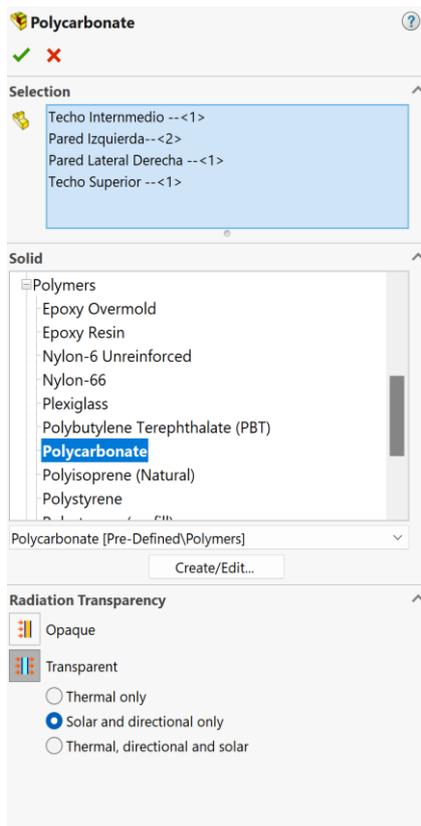


Figura 12

Condiciones de contorno en la entrada de flujo

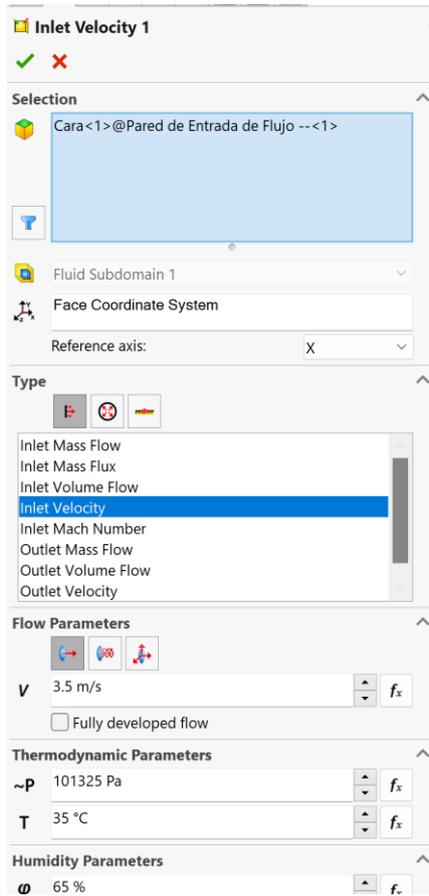


Figura 13

Condiciones de acabado

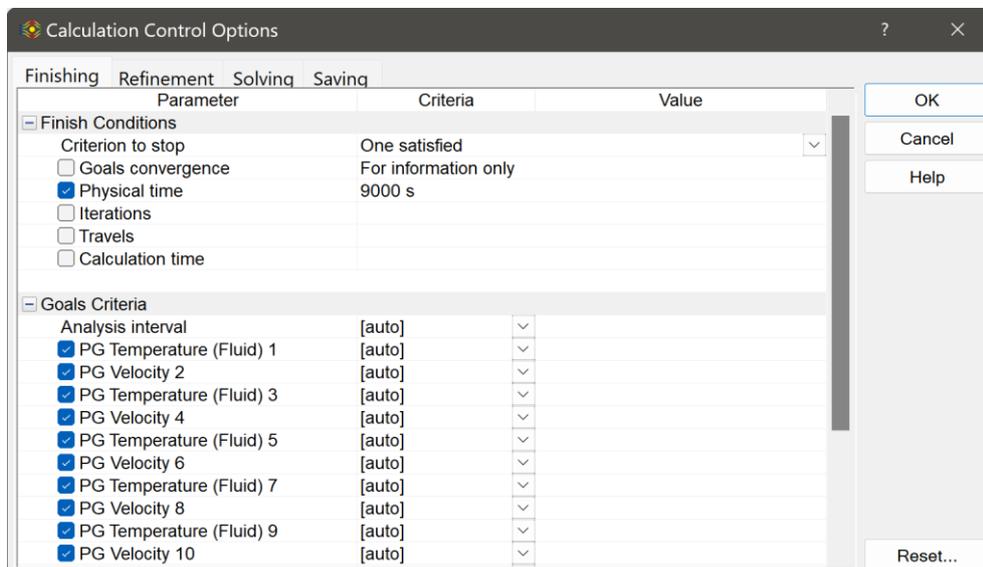


Figura 14

Configuración de refinamiento

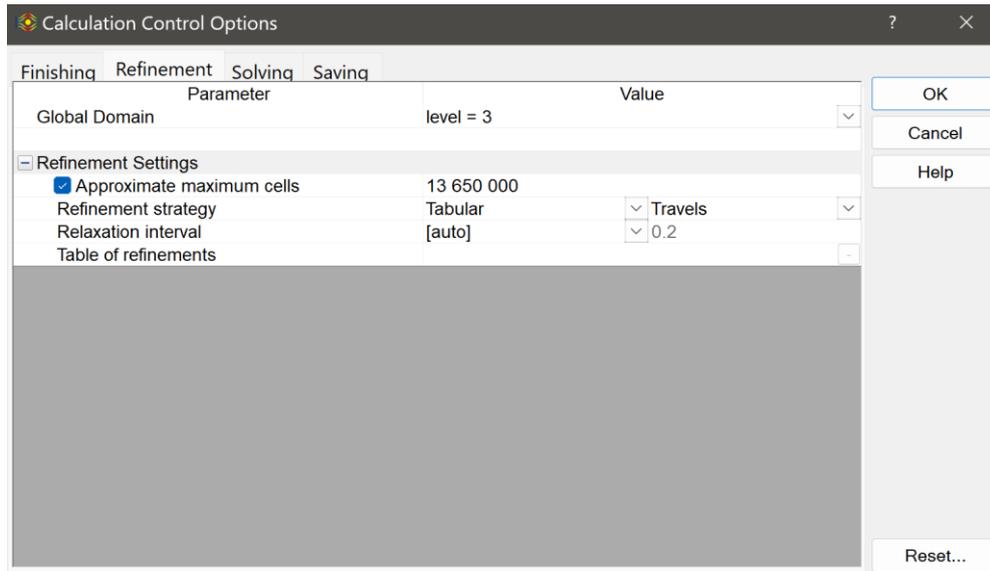


Figura 15

Configuración de resolución

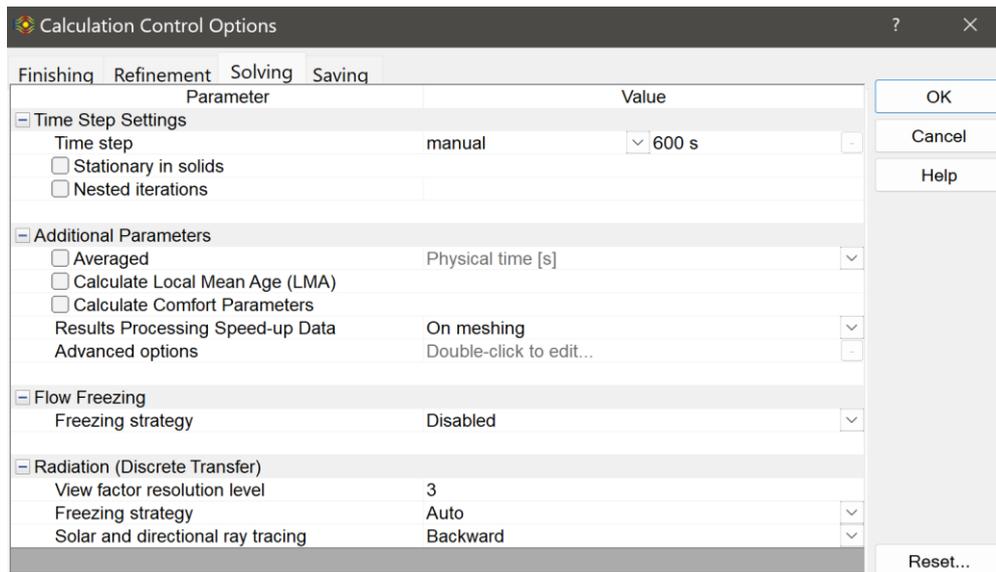
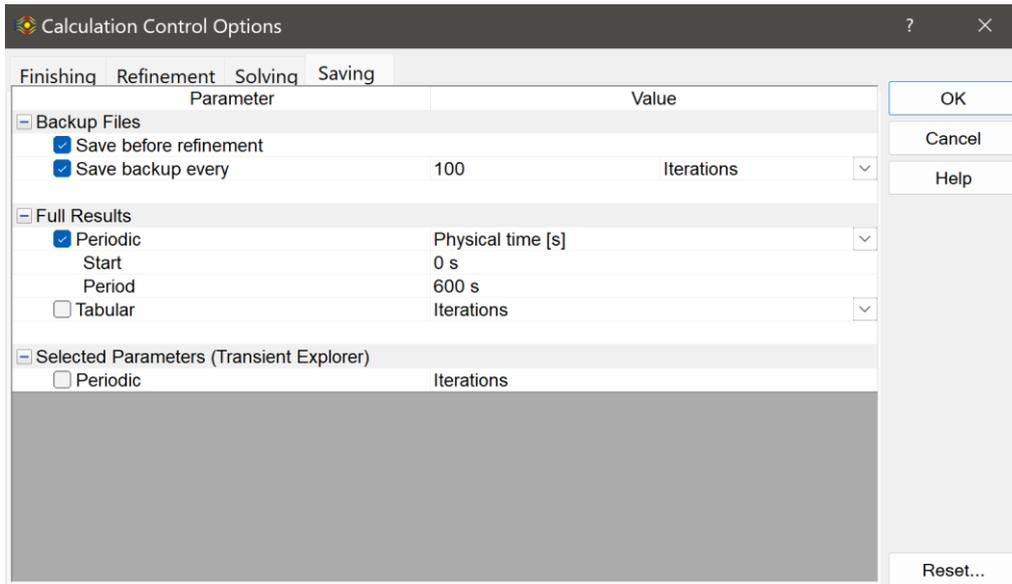


Figura 16

Configuración de guardado



Capítulo 3

3.1 Datos experimentales

La modelación del equipo fue realizada en el software SolidWorks para analizar el comportamiento del flujo de aire caliente y la temperatura dentro de la cámara de secado, todas las simulaciones se ejecutaron al vacío, sin considerar materia prima, bandejas, estanterías u objetos dentro del área de secado.

En esta sección, se muestran el equipo original construido para su posterior evaluación de su funcionalidad (Figura 17). Los resultados recopilados de la temperatura ambiente y puntos de críticos dentro de la cámara de secado (Tabla 8), para después graficar la curva de temperatura versus tiempo, tendencia y valores que oscila la temperatura.

Figura 17

Secador solar tipo invernadero sin modificaciones

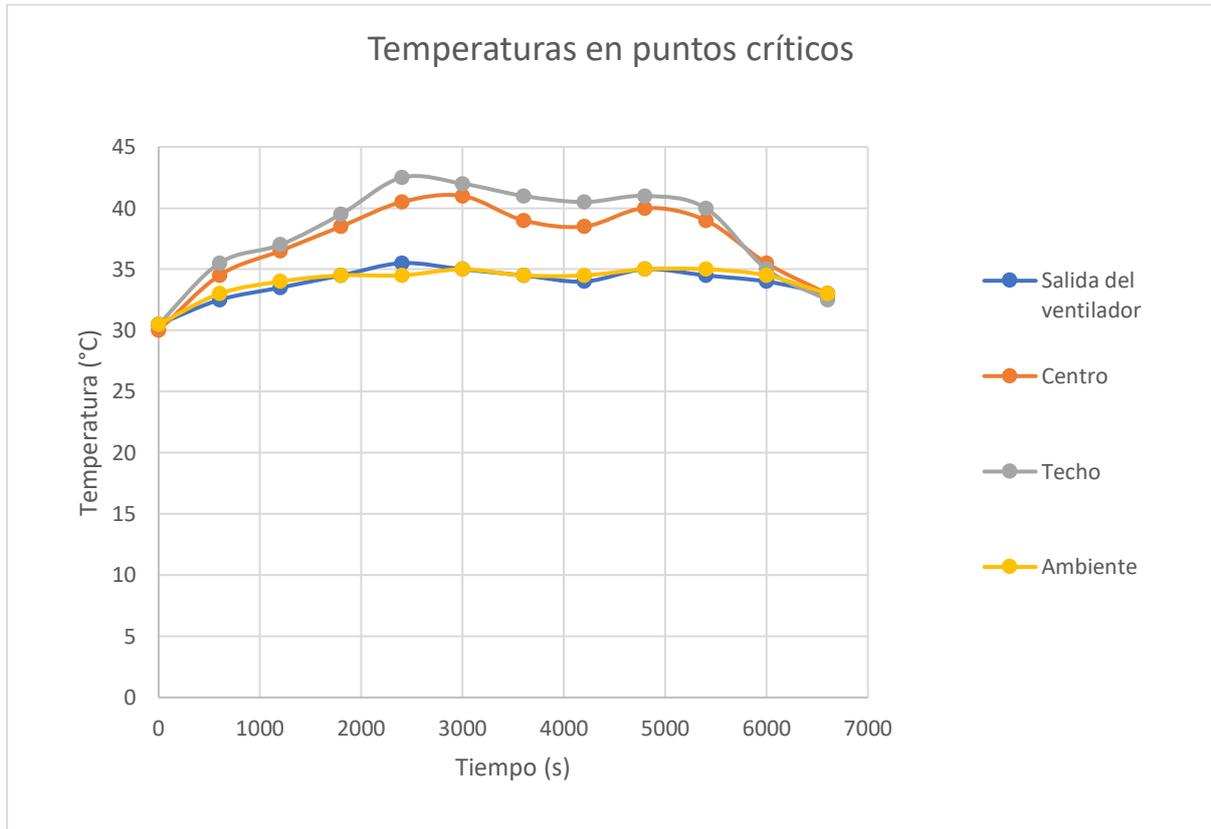


Tabla 8*Medición de temperatura en puntos críticos*

Tiempo (s)	Temperatura en el centro (°C)	Temperatura en la salida del ventilador (°C)	Temperatura en el techo (°C)	Temperatura ambiente (°C)
0	30	30.5	30.5	30.5
600	34.5	32.5	35.5	33
1200	36.5	33.5	37	34
1800	38.5	34.5	39.5	34.5
2400	40.5	35.5	42.5	34.5
3000	41	35	42	35
3600	39	34.5	41	34.5
4200	38.5	34	40.5	34.5
4800	40	35	41	35
5400	39	34.5	40	35
6000	35.5	34	35	34.5
6600	33	33	32.5	33

Figura 18

Temperatura vs tiempo en puntos críticos de la cámara



La figura 18 presenta como cambia la temperatura en un tiempo de 6600 segundos donde se registra temperaturas mínimas de 30°C y temperaturas máximas de 30°C, también se comprende que el flujo de aire trabaja inversamente proporcional a la temperatura y eso evidencia la curva de temperatura ambiente y salida de ventilador o como después se llamara entrada de aire. Esto para nosotros fue el primer problema que se registró y se tomó en cuenta para validar las alternativas más adelante.

También, se ejecutó la medición de radiación durante 3600 segundos al mismo tiempo que se evaluó el secador (Tabla 9). Con la ayuda del pirómetro y un multímetro en la opción de medición de voltaje en milivoltios de corriente directa, para posteriormente calcular la radiación con la conversión indica por el fabricante de $1 \frac{W}{m^2}$ es igual a $13.77 \times 10^{-6} V$ con el propósito de utilizar los datos de radiación para la simulación.

Tabla 9*Adquisición de datos de radiación solar*

Tiempo (s)	Voltaje (mV)	Voltaje (V)	Radiación ($\frac{W}{m^2}$)
0	5.3	0.0053	384.89
600	6.8	0.0068	493.82
1200	7.8	0.0078	566.44
1800	4.5	0.0045	326.79
2400	4.9	0.0049	355.84
3000	4.6	0.0046	334.05
3600	5.6	0.0056	406.68

3.2 Resultados y análisis

La modelación del equipo fue realizada en el software SolidWorks para analizar el comportamiento del flujo de aire caliente y la temperatura dentro de la cámara de secado, donde todas las simulaciones se ejecutaron al vacío, sin considerar materia prima, bandejas, estanterías u objetos dentro del área de secado.

3.2.1 Resultados del modelo original

El diseño original del secador solar tipo invernadero que se visualiza en la figura 19, presenta una concentración de flujo de aire en las zonas inferiores como se muestra en la figura 20 y demostrando que las velocidades en la zona central y superior son inferiores a 0.4 m/s; ya que, el fluido tiende a moverse por las paredes y rebotar con las puertas creando un vórtice en la entrada de flujo, provocando que las velocidades del aire se pierdan en las diferentes sectores de la cámara de secado. Además, al entrar por separado, los fluidos no se mezclan entre sí, lo que crea zonas sin movimiento (Figura 21), y el muro Trombe no aporta ningún beneficio en el

movimiento del fluido, pero si en el aumento de temperatura del aire. También se registró una reducción en la velocidad de flujo en la entrada ya que se presenció una caída de presión en la salida del flujo, por lo que ya tenemos otro error de diseño que se debió corregir.

Figura 19

Diseño del secador original

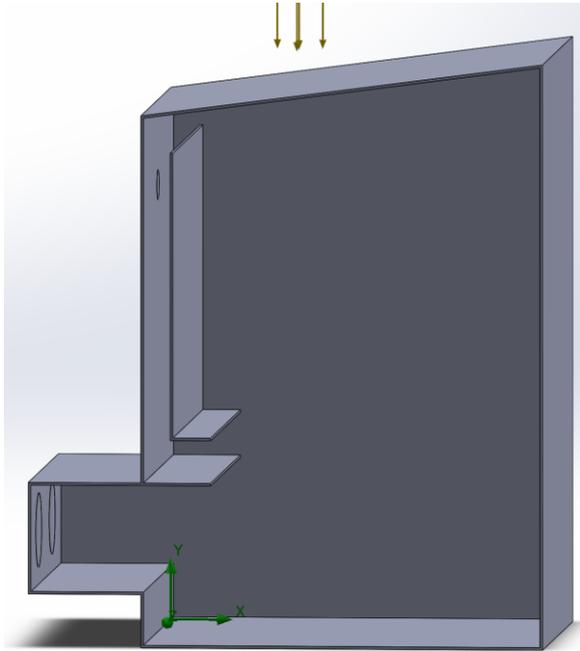


Figura 20

Velocidades en la cámara de secado mediante el diseño original

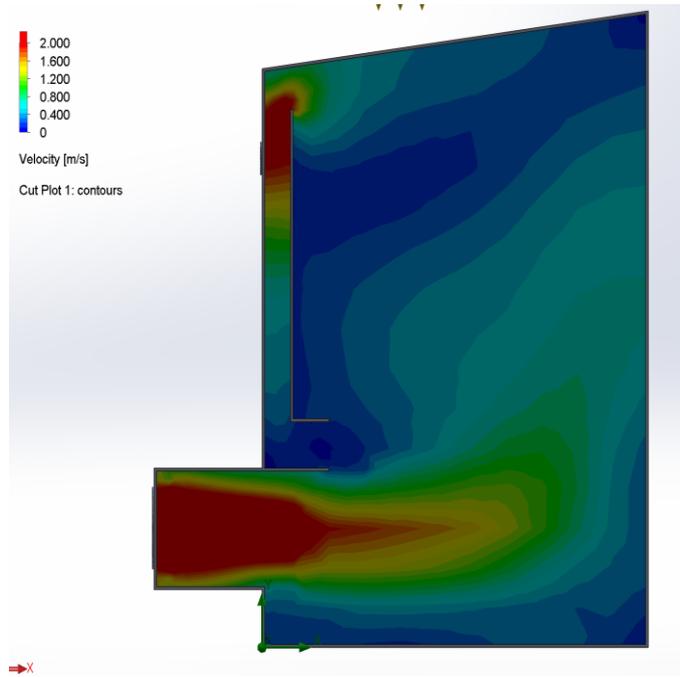
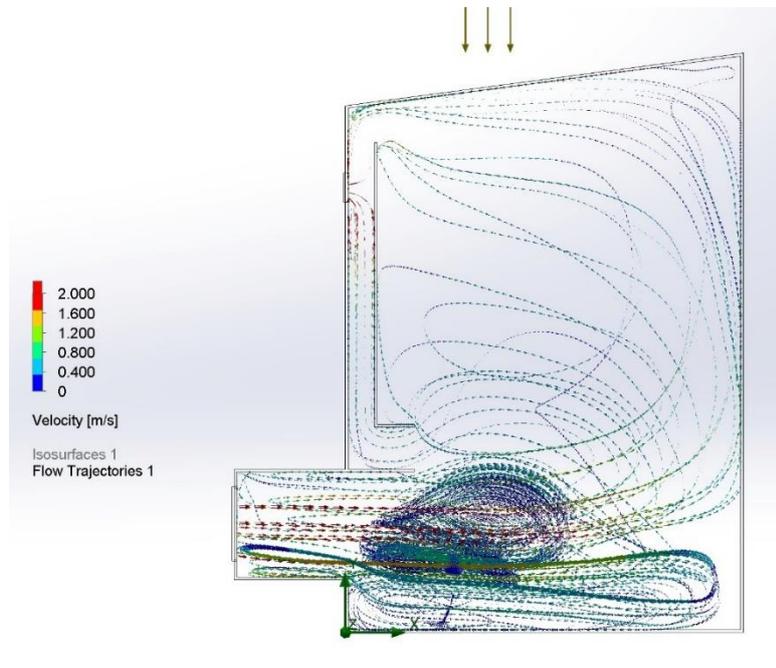


Figura 21

Líneas de trayectoria de la velocidad



3.2.2 Resultados del modelo con baffle

Se propuso la incorporación de un baffle y cámara de recolección de aire caliente (Figura 22). En la figura 16, proporciona una pequeña elevación del fluido, lo que el mismo cae y se concentra en pocas zonas del secador como indica la figura 23, reflejando velocidades aún más bajas que el modelo anterior. La salida muestra una mejora ya que el fluido recorre la cámara sin generar vórtices, pero existe velocidades muy bajas en la parte superior y central de la cámara, por el motivo de caída de presión y pérdidas en el transcurso del retorno hacia a tras del ventilador.

Figura 22

Diseño del secador con baffle

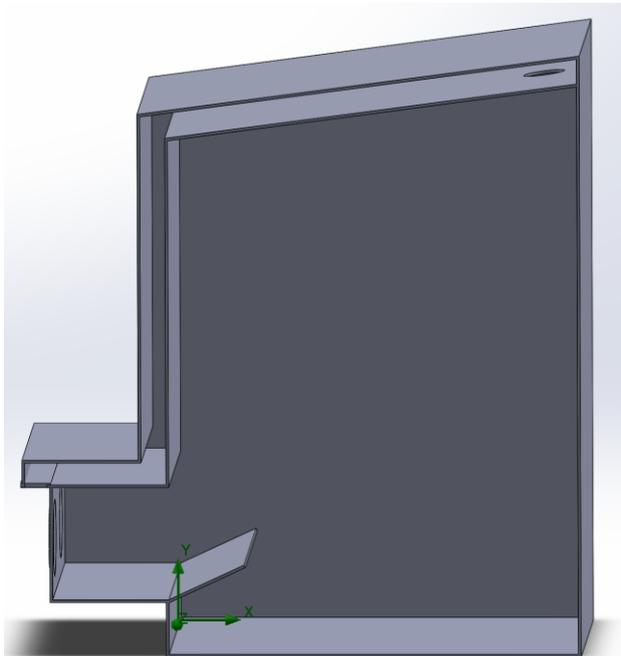
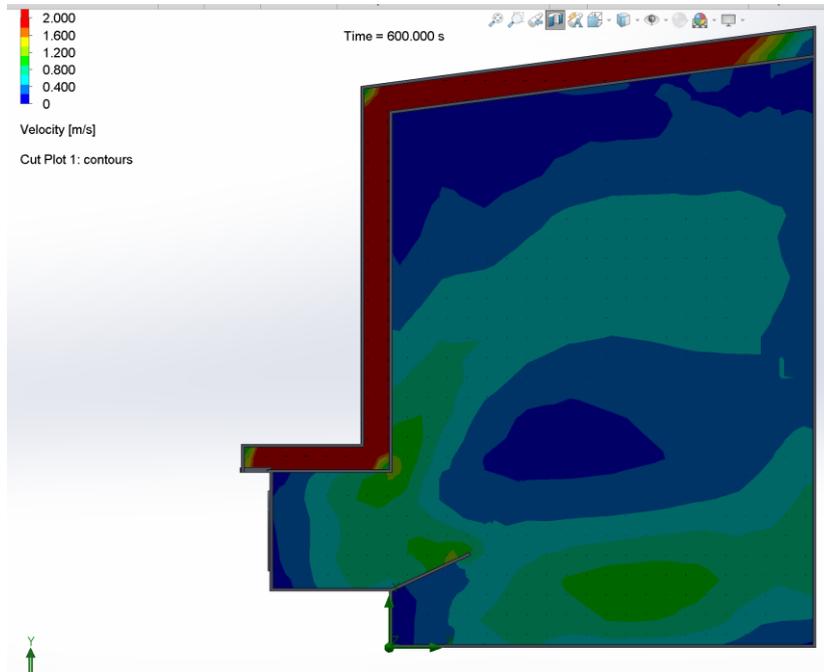


Figura 23

Velocidades en la cámara de secado mediante del modelo con baffle



3.2.3 Resultados del modelo con dos paredes a la entrada y salida

Para esta ocasión se probó dos paredes trombe con el objetivo de forzar al fluido a ascender y, posteriormente descender, como se presenta en la figura 24. La salida estaba posicionada sobre la pared que albergaba las puertas, lo que implicaba la posibilidad de realizar modificaciones en la estructura como la salida del aire. En la figura 25 se muestra velocidades mayores a 0.8 m/s en la parte central, pero aún tenemos que añadir que la zona inferior presenta velocidades muy bajas, causando que el producto ubicado en esas zonas conserve su humedad.

Figura 24

Diseño del secador con dos paredes a la entrada y salida

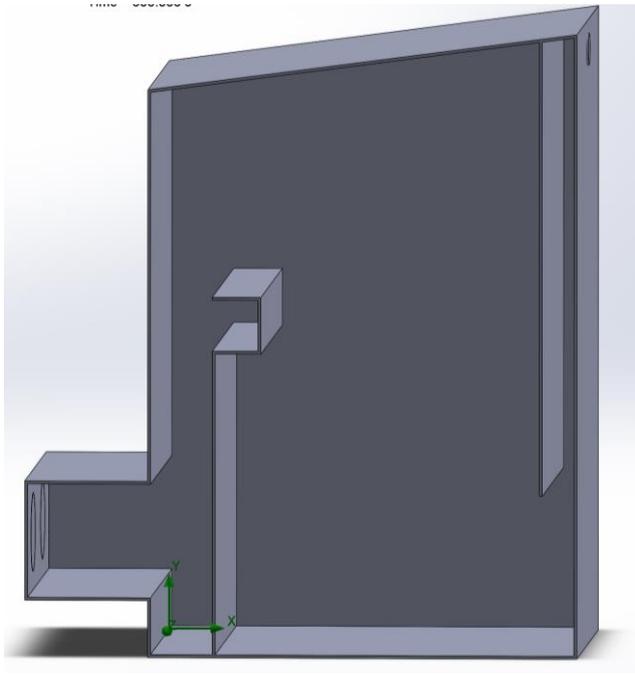
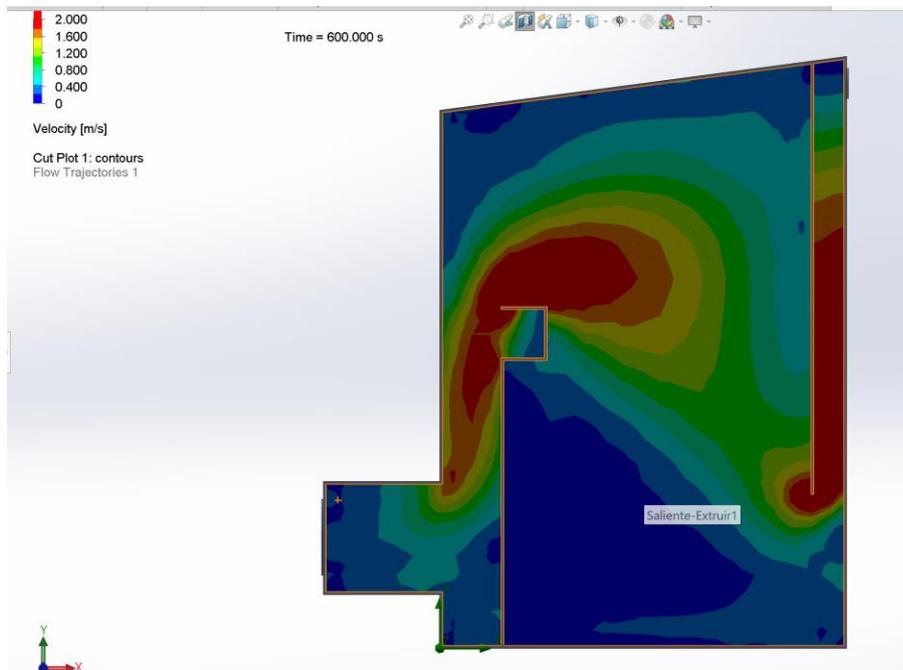


Figura 25

Velocidades en la cámara de secado mediante del modelo con dos paredes a la entrada y salida



3.2.4 Resultados del modelo con elevación de pared

La siguiente adecuación, fue la elevación de la pared 5 cm sobre el suelo ilustrada en la figura 26, con propósito de segmentar el flujo y permitir su recirculación en toda la cámara. Por el cual, el flujo se dividió mientras levantábamos la pared, pero se tornó inestable. A una altura de 8 a 10 cm, el flujo se desplazó completamente hacia la parte inferior de la cámara, generando áreas sin movimiento como se muestra en la figura 27. Todo esto suponiendo que todo el aire que entra sale de la cámara, es decir no hay infiltración.

Figura 26

Diseño del secador con elevación de pared

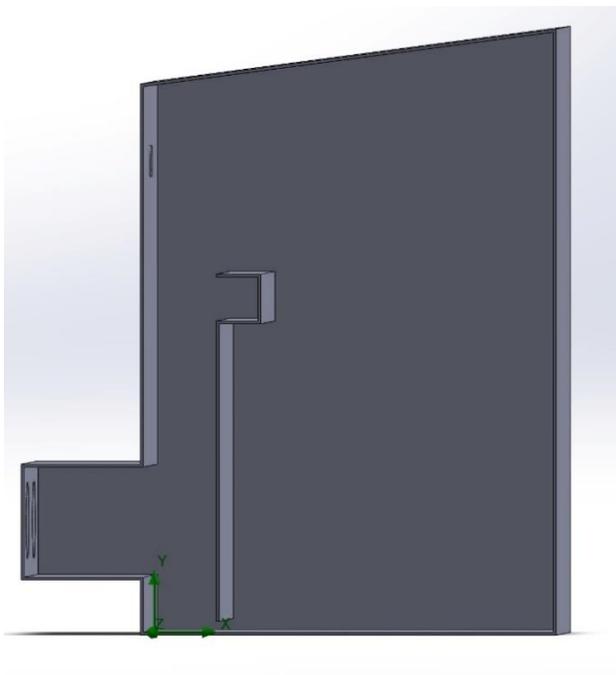
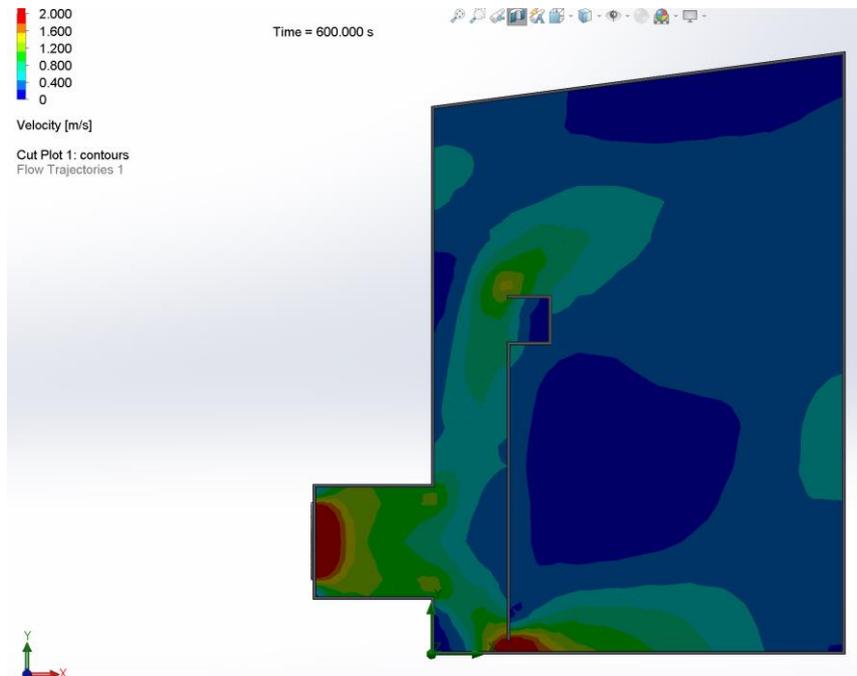


Figura 27

Velocidades en la cámara de secado mediante del modelo con elevación del colector



3.2.5 Resultados del modelo con dos entradas de aire en la parte superior de las puertas

En esta ocasión, el diseño consistió el uso de 4 ventiladores, de los cuales 2 operaron en conjunto con la resistencia para calentar el aire y los 2 restantes en la parte superior (Figura 28) con el objetivo de facilitar el movimiento del flujo dentro de la cámara, y se posicionaron sobre la pared que albergaba las puertas (Figura 29). No obstante, estos últimos ventiladores trabajaron con aire a temperatura ambiente, generando como consecuencia una mejora en el flujo en toda el área de secado. Sin embargo, desencadenaron una reducción significativa en la temperatura como se visualiza en la Figura 30, ya que se mezcla un fluido a una temperatura de 50°C y 20°C. Esta condición no resultó favorable para el secador, porque entorno exhibía cierto grado de humedad, mayor consumo eléctrico y costo de fabricación.

Figura 28

Diseño del secador con dos entradas de aire en la parte superior y parte posterior

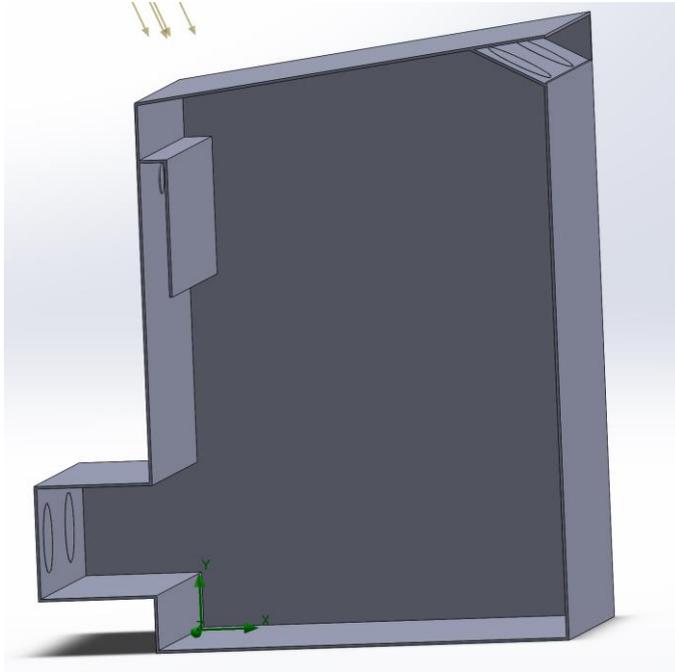


Figura 29

Velocidades en la cámara de secado del modelo con dos entradas de aire en la parte superior y parte posterior

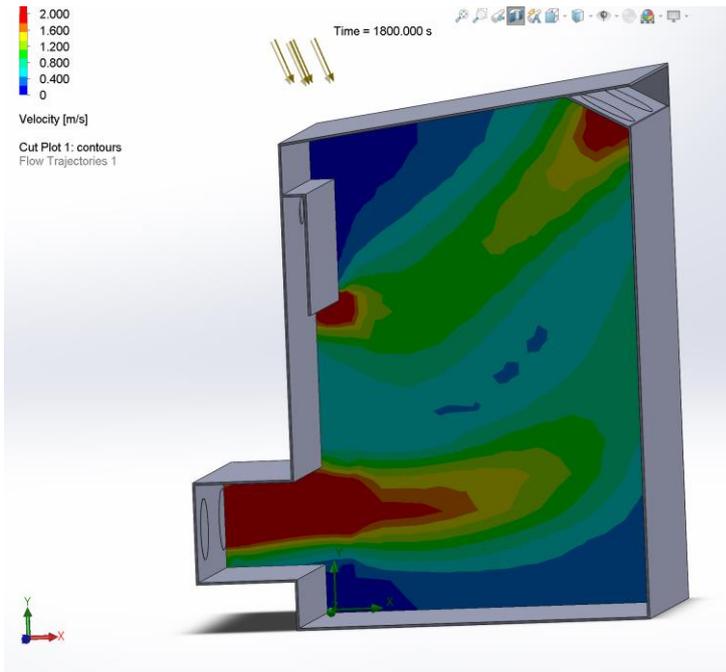
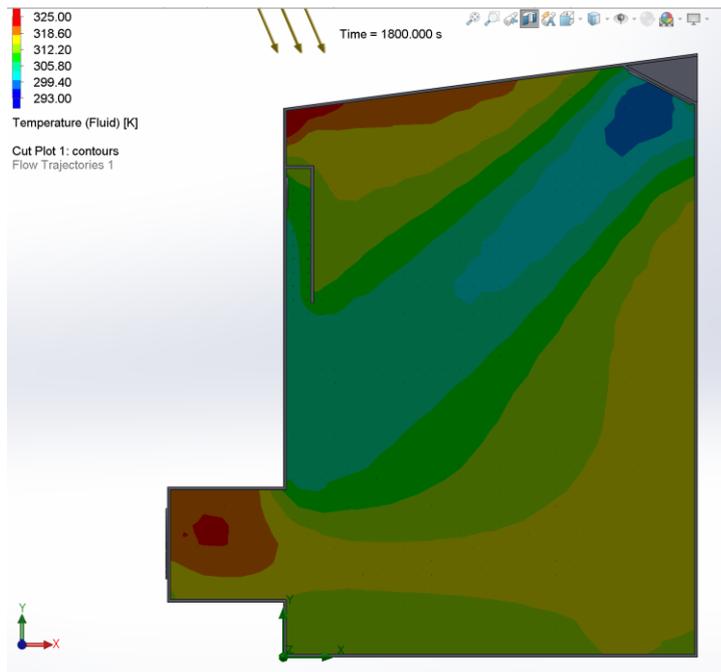


Figura 30

Temperaturas en la cámara de secado mediante del modelo con dos entradas de aire en la parte superior y parte posterior



3.2.5 Resultados del modelo con cuatro entradas de aire en la parte posterior

Ahora se propuso adicionar 2 ventiladores con flujo a temperatura ambiente ubicados en la pared de entrada de flujo como se refleja en la figura 31. En la figura 32, se visualizan las velocidades dentro de la cámara, donde estas mejoran considerables dando un promedio de 0.7 m/s, pero la temperatura decae como se muestra en la figura 33, ya que los ventiladores superiores tienen una temperatura ambiente, y los ventiladores de inferiores usan resistencias para calentar el flujo a 50°C. Además, esta solución presenta mayores costos de trabajo, producción y consumo energético ya que, si queremos usar esta idea, se debería proponer también el aumento de resistencias en los ventiladores adicionales.

Figura 31

Diseño del secador con cuatro entradas de aire en la parte posterior

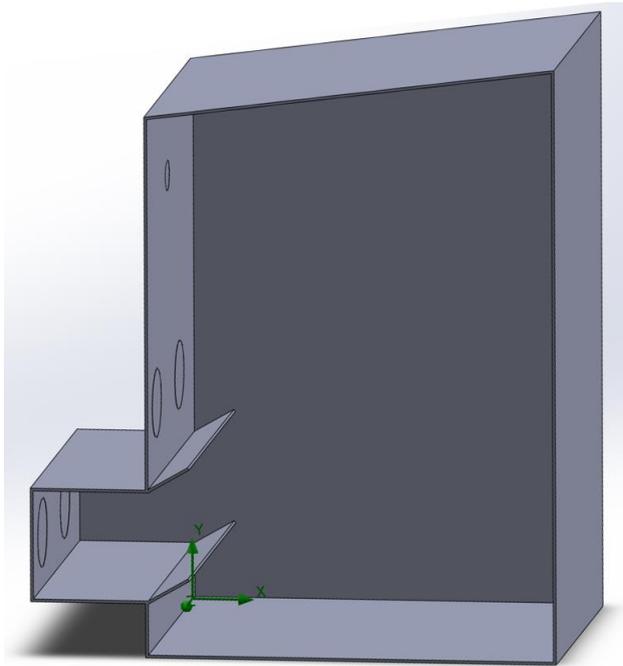


Figura 32

Velocidades en la cámara de secado mediante del modelo con cuatro entradas de aire en la parte posterior

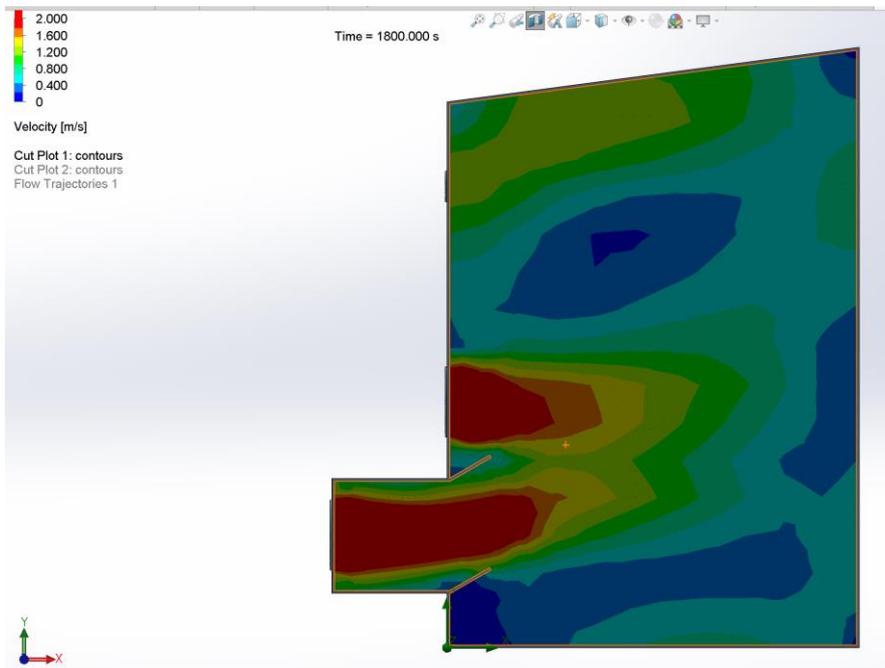
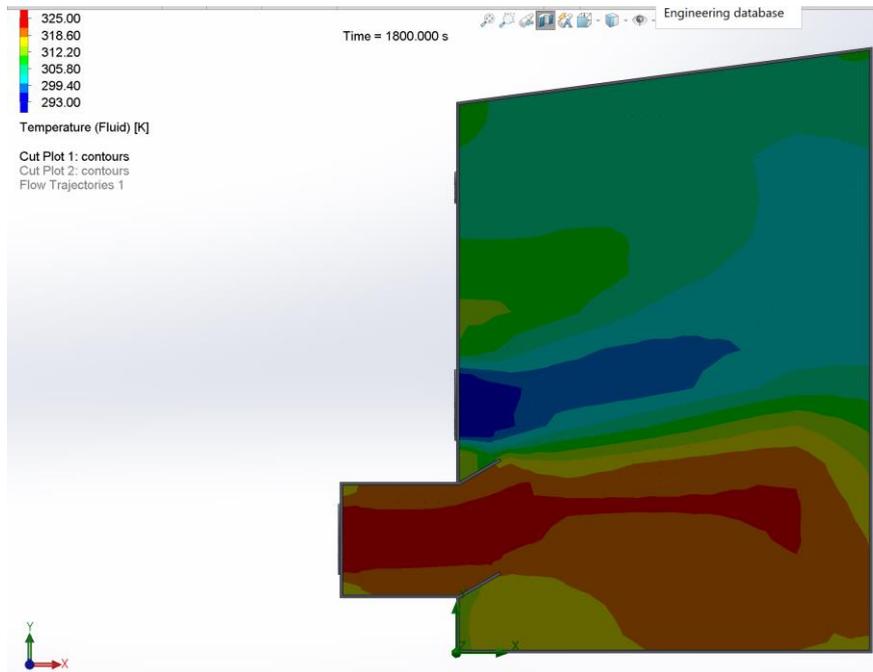


Figura 33

Temperaturas en la cámara de secado mediante cut plot del modelo con cuatro entradas de aire en la parte posterior



3.2.7 Resultados del modelo con pared difusora

También se pensó en utilizar una pared perforada vertical recta con una altura de 1250 mm que abarcaba todo el ancho de la cámara como se contempla en la Figura 34. La simulación demostró una distribución de flujo en desarrollo, pero no suficiente y retorno del fluido en pequeña escala. También, se observó que el flujo formaba estancamientos en zonas de importancia (Figura 35), especialmente en la mitad. Se evidencia que la capacidad del ventilador original no podría funcionar correctamente con la caída de presión que tiene el diseño y las pérdidas formado por el esfuerzo de distribuir el aire hacia adentro. Y, por último, concluimos que la salida no tiene ningún provecho en su dimensión y ubicación, por lo que se propondrá más adelante cambiar la salida, aunque se requiera aumentar los costos.

Figura 34

Diseño del secador con colector difusor

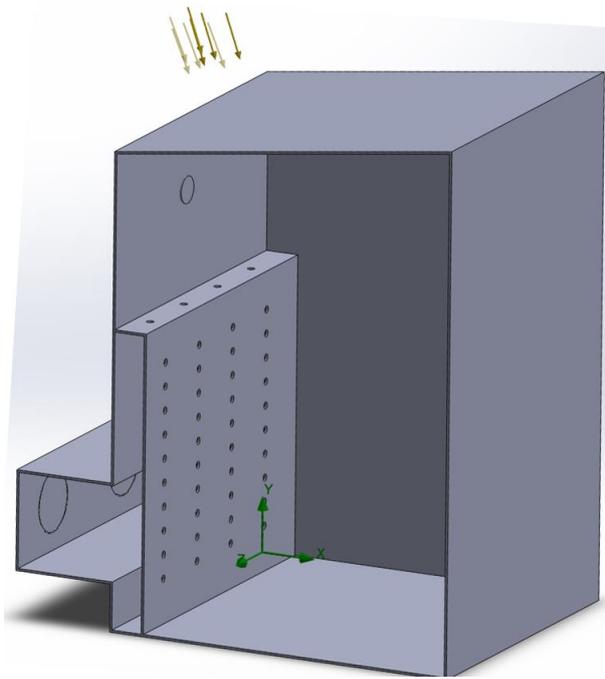
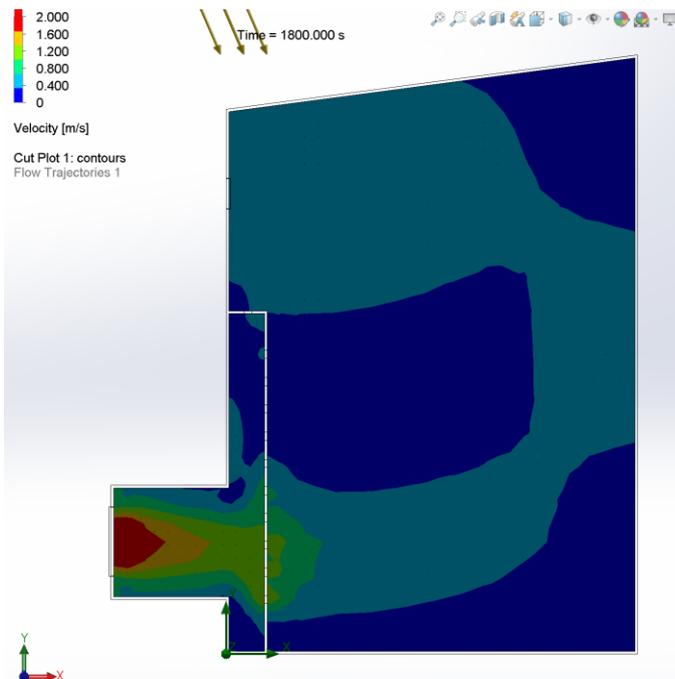


Figura 35

Velocidades en la cámara de secado mediante cut plot del modelo colector difusor



3.2.8 Resultados del modelo con Venturi en la entrada, colector y pared difusora

Debido a ventajas y desventajas de los modelos anteriores y otros que no se pusieron por su resultado similar, se puede ir definiendo un diseño final. Así también, se propuso el cambio del ventilador ya que el original no resulto eficiente para remover un aproximado de 4 a 5 metros cúbicos que tiene la cámara de aire estancado. Así que, se realizaron cambios significativos en la modelación del diseño, específicamente en la sustitución de los dos ventiladores de 250 mm de diámetro por un ventilador industrial de 500 mm de diámetro (Figura 36) y con un flujo medido de 3,5 m/s, con esto el flujo masico aumento significativamente.

Para resolver el problema de la distribución en toda la cámara, se pensó en paneles perforados ya que esto se comprobó que ayuda mucho en abrir el flujo en diferentes direcciones, también el uso de baffles curvos lo cual también se definió que ayuda a subir el flujo de aire. A la vez que se simulaba se definió también el uso de paredes que dividan el flujo y mantengan una distribución constante, para ello se diseñó unos divisores, los cuales también sirven de nervio para el panel que se propuso inclinado. La inclinación del panel perforado fue estratégica ya que esto, ayuda a que el fluido no se estanque y tenga más liberta al salir a la cámara.

Las dimensiones del panel superior inclinado fueron de acuerdo con el material que ya se tenía del diseño original. El número de perforaciones y su sentido de ubicación fueron variables en el simulador hasta encontrar una forma que compense los parámetros de trabajo. También, se propuso que la salida tenga una geometría y dimensión más aceptable, ahora el flujo se recogió desde el centro del techo, la idea es que se pueda recalentar con la radiación y pueda deshumidificarse para después poderla rehusar en modelos futuros.

Estas modificaciones han contribuido a lograr un flujo más estable, mejorando su desempeño durante períodos de trabajo más extensos (Figura 37). Sin embargo, se evidencian dificultades en las zonas inferiores, donde el flujo es notablemente bajo y la salida continua con una caída de presión, aunque ya es más fluido. Asimismo, a lo largo de un mayor tiempo de

trabajo, un point goals puesto en la simulación, nos mostró que tendencia del flujo hacia las paredes del secador en lugar de dirigirse hacia el centro.

Figura 36

Diseño del secador con modelo con Venturi en la entrada, colector y pared difusora

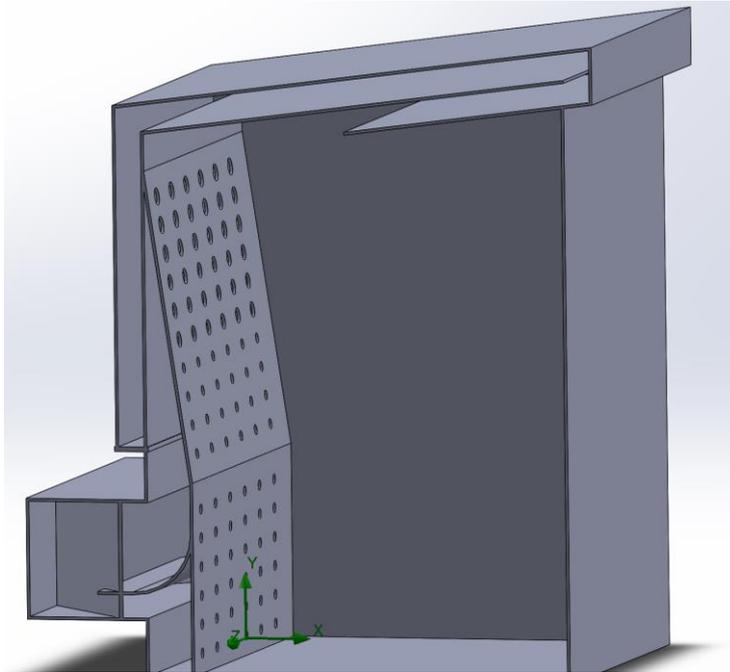
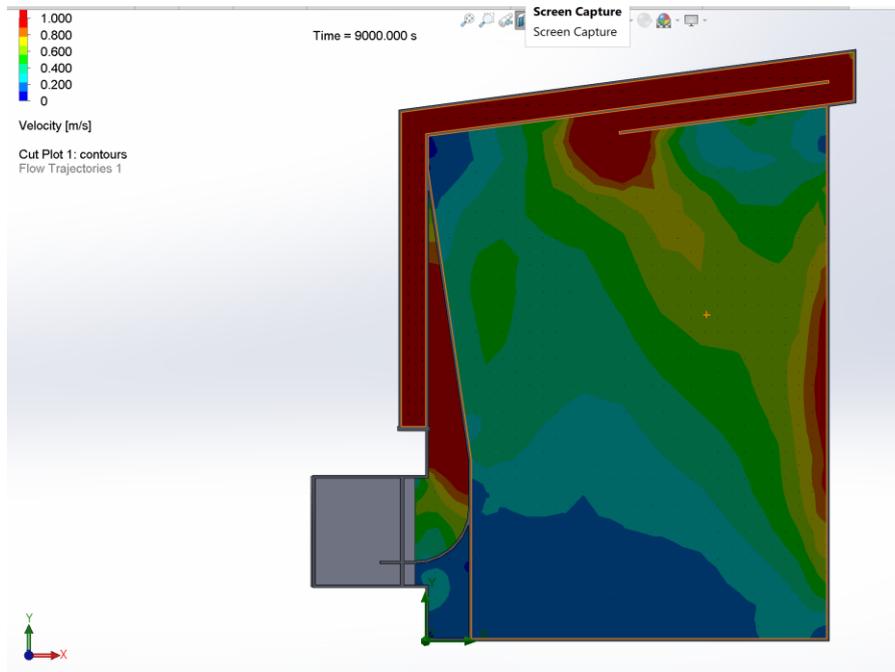


Figura 37. Velocidades en la cámara de secado mediante del modelo con Venturi en la entrada, colector y pared difusora



3.2.9 Resultados del modelo Venturi en la entrada, colector y pared difusora superior

Finalmente obtenemos un diseño que promete cumplir con los desafíos anteriores. El diseño está compuesto por un baffle curvo superior e inferior y una pared difusora con perforaciones de 38 mm de diámetro (Figura 38). La inclinación y perforaciones en el panel, como ya se dijo anteriormente facilitan el acceso del fluido caliente y los divisores de flujo ayudan a mantenerlo concentrado en el centro de la cámara. Como la simulación es en vacío, se propuso eliminar un panel perforado inferior y poner el baffle curvo a una distancia estratégica en la entrada del flujo, con esto pretendemos que al ubicar las estanterías de los granos el flujo choque y se esparza en todas las direcciones. También se usó un tipo de entradas tipo Venturi que ayuda a que el flujo siga su trayectoria y no produzca caídas de presión. Finalmente, el flujo se extrae a través del colector y se envía al exterior el tamaño de este fue anulado con cuidado para evitar caídas de presión y ubicado correctamente para que el fluido pueda salir con más facilidad como se ilustra en la figura 39.

Figura 38

Diseño del secador con Venturi en la entrada, colector y pared difusora superior

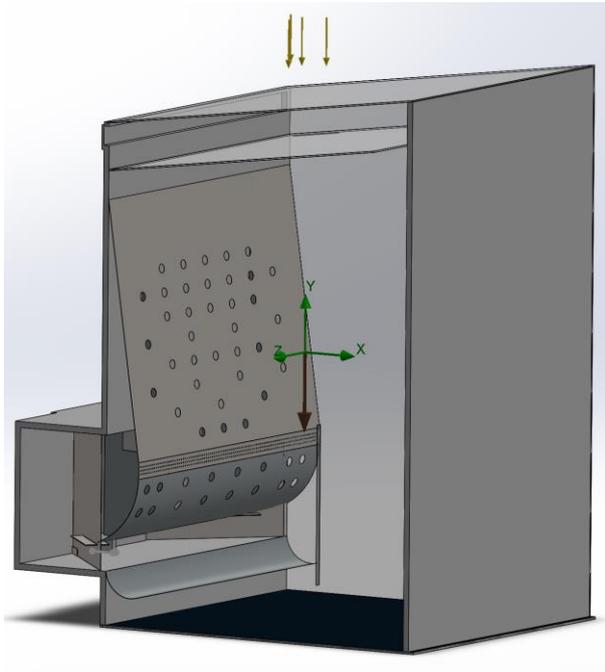
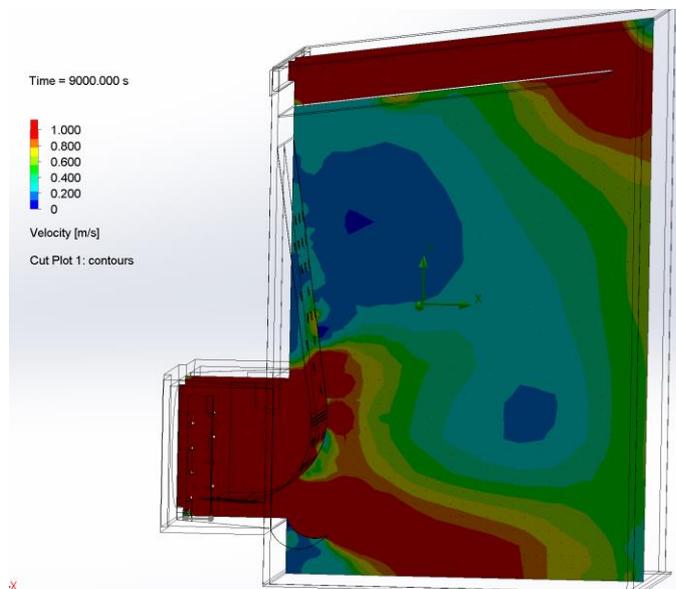


Figura 39

Velocidades en la cámara de secado mediante el modelo del secador con Venturi en la entrada, colector y pared difusoras superior



3.2.10 Matriz de decisión

Para la selección del diseño que permita la adecuación del diseño original, fue necesario desplegar ideas que cumplan con los requisitos de diseño, así como propuestas de cambio de ventilador, reubicación de la salida, modificación en la geometría del diseño, etc. Así que, se evaluaron las posibles soluciones considerando los criterios de diseño definidos en el capítulo 2.

La tabla 10 determino que la óptima solución es el modelo de Venturi en la entrada, colector y pared difusora superior, porque permite una mejor distribución del flujo, menor consumo energético, fácil mantenimiento, alta capacidad de secado y temperaturas.

Tabla 10. Matriz de decisión

Criterios y ponderaciones		Eficiencia Térmica 26%	Consumo Energético 18%	Capacidad de Secado 15%	Mantenimiento 15%	Temperatura 26%	Total
Modelo original	Ponderación	1	2	1	2	1	1.23
	Resultado	0.26	0.36	0.15	0.30	0.26	
Modelo con baffle	Ponderación	1	2	1	2	2	1.59
	Resultado	0.26	0.36	0.15	0.30	0.52	
Modelo con cuatro entradas de aire en la parte posterior	Ponderación	3	1	2	1	1	1.67
	Resultado	0.78	0.18	0.30	0.15	0.26	
Modelo de pared difusora	Ponderación	2	2	2	1	1	1.59
	Resultado	0.52	0.36	0.30	0.15	0.26	
Modelo con Venturi en la entrada con colector y pared difusora	Ponderación	2	2	2	2	2	2
	Resultado	0.52	0.36	0.30	0.30	0.52	
Modelo con Venturi en la entrada, colector y pared difusora superior	Ponderación	3	2	3	2	2	2.41
	Resultado	0.78	0.36	0.45	0.30	0.52	

3.3 Análisis de resultados de la solución

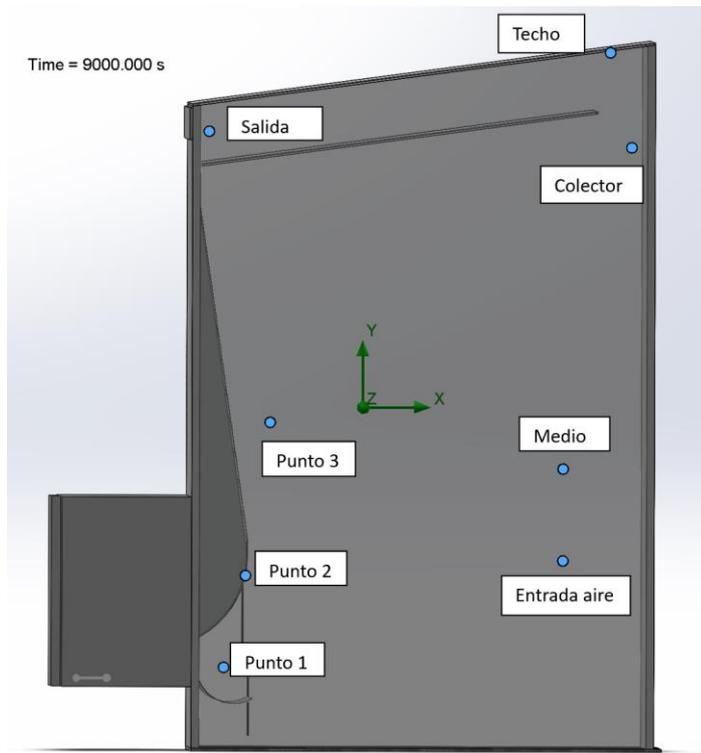
Después de realizar las pruebas al vacío, se avanza a la segunda etapa de simulación, que implica modelar el diseño considerando el funcionamiento de las resistencias eléctricas como tasa de generación de calor de 4000 W que se encuentra disponible en CDTS, también que la temperatura ambiente mantiene un promedio de 35°C por el tiempo y la zona geográfica. Se seleccionaron puntos estratégicos en el centro de la cámara para analizar y cuantificar la velocidad y temperatura de operación de esta (ver Figura 40). Se colocaron puntos para su análisis cuyos son los siguientes;

- El punto 1 se encuentra ubicado encima del baffle curvo inferior
- El punto 2 se evalúa en la zona de la pieza de malla
- El punto 3 en el panel perforado en la salida de un hueco arbitrario
- Un punto en la entrada del colector
- Un punto en la salida del flujo
- Un punto en la entrada de aire
- Un punto en medio de la cámara
- Un punto en el techo

Los puntos 1, 2 y 3 se analizaron para ver la distribución de flujo mediante su velocidad, mientras el punto del colector y la salida son para evaluar la caída de presión y su temperatura. Por otro lado, los puntos de entrada de aire, medio de la cámara y en el techo de la cámara, son para evaluar la humedad, la temperatura del secador, esto puntos fueron estratégicos para el análisis posterior entre experimental y teórico como se muestran más adelante en el Apéndice C.

Figura 40

Puntos de estudio en la cámara de secado del modelo final



En la figura 41, tenemos el resultado de velocidades en cada punto, la cual muestra que las velocidades crecen se estabilizan rápidamente, por lo que evidencia que la distribución del flujo es bueno, y que sus dimensiones no son iguales, pero es porque la simulación es en vacío, y se pretende que al introducir las estanterías en la cámara las velocidad se igualaran en los puntos de interés como se muestra en el comportamiento de la simulación en Apéndice B, los cuales indica que el flujo choca la pared y sube si distorsionarse y no afecta a otros puntos. Según el resumen de la simulación, la velocidad promedio en los 0,4 m/s a 4 m/s, pero como ya dijimos esto puede variar al tener las estanterías llenas de granos, pero no afectaría el comportamiento constante.

Figura 41

Gráfica de velocidad vs tiempo de la simulación de la solución

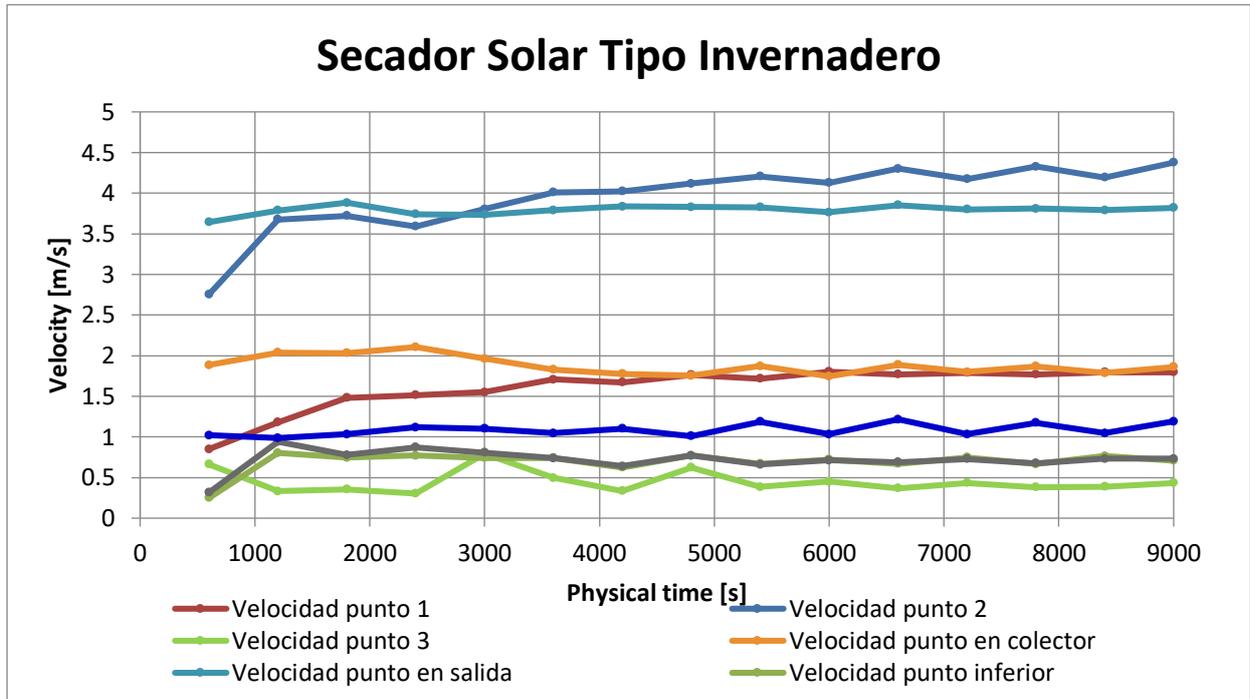
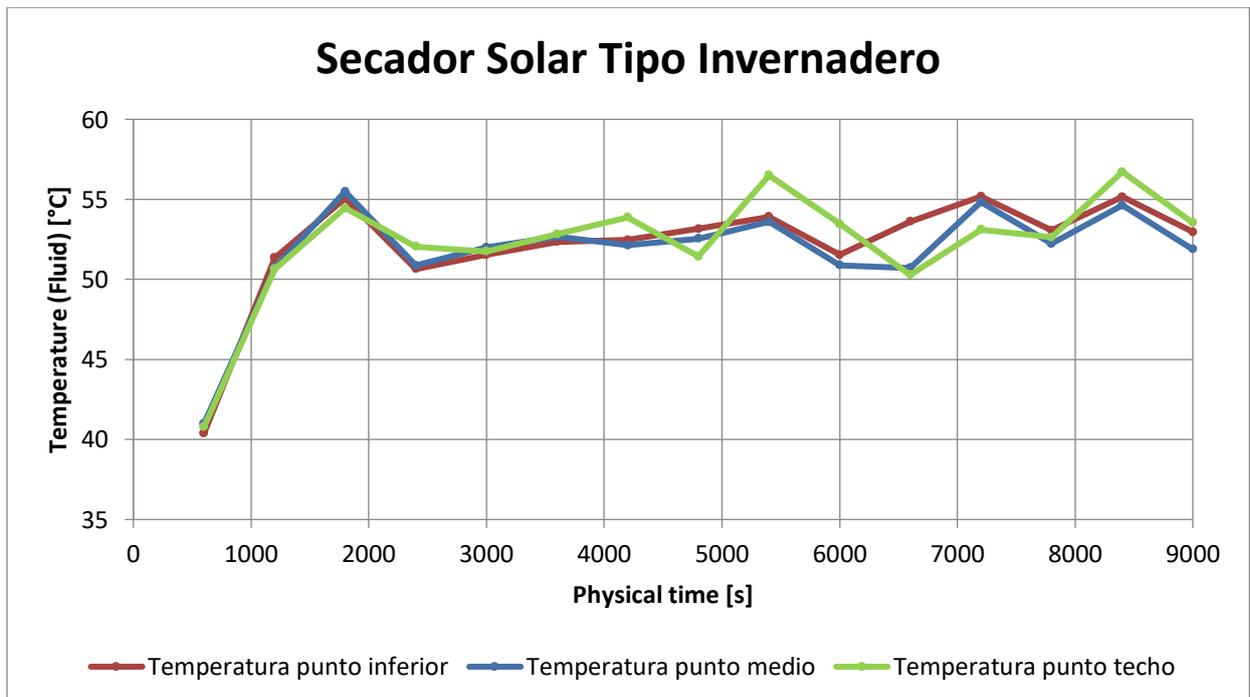


Figura 42

Gráfica de temperatura vs tiempo de la simulación de la solución



Como se observa en la figura 42, el comportamiento de las temperaturas en cada punto crece rápidamente y se mantiene entre el rango de secado que fue de 50 °C a 60 °C lo que indica que el diseño es efectivo para el secado de granos. Y estos puntos se mueven en la entrada de aire a 0,7 m/s como promedio, en la zona media a 0,7 m/s como promedio y 1 m/s en el techo. Con estos resultados garantizamos un flujo caliente dentro de la cámara y la velocidad de secado ya dependerá del porcentaje de humedad que contenga el tipo de grano que se ponga a secar. Estos puntos cambiarán al momento cuando el secador este con los granos a dentro del secador, pero al ver su comportamiento en la simulación puesta en Apéndice B, se pretende que no cambie mucho ya que las estanterías se comportarían como paredes al igual que esta la pared de puertas y el flujo se esparciría mucho mejor. Cabe señalar que el secador se ve estrechamente dependiente de la calidad del aire entrante, sobre todo en la temperatura ya que afecta directamente al rendimiento del secador.

3.4 Planos constructivos

Para la implementación del nuevo diseño se trabajaron las piezas originales como paredes laterales techo superior y la pared donde están las puertas. Se realizaron cambios en la pared de entrada de flujo para adaptar el nuevo ventilador y el sellado de la salida original. También la creación de nuevas piezas como pared que sirven como tipo Venturi, baffles curvos, el panel perforado y divisor de flujo. Todas estas piezas se detallan en la sección de apéndices.

3.5 Diseño de la solución del secador tipo invernadero

En esta sección, se muestra la construcción del nuevo sistema de distribución de aire del secador tipo invernadero que consta de baffles curvos los cuales ayudan a levantar el flujo, las paredes perforadas por su lado se encargan de distribuir el aire, el techo intermedio forma un tipo de espacio en el techo el cual está diseñado para que el flujo tenga la mayor libertad y salga y

pueda calentarse más con la radiación. Para la fabricación de las piezas se contabilizó el material existente y el material faltante, más los procesos previos a la instalación de las piezas.

3.5.1 Construcción del diseño

En la construcción del secador se empezó por mejorar la pared de flujo de entrada, la cual se tuvo que agrandar, tapar los huecos de los 2 ventiladores, y reemplazarlo por un solo ventilador de 500 mm de diámetro. En la figura 43, se observa la extracción de rejillas y otras partes del diseño original, ya que son piezas que obstaculizarán la instalación de las nuevas partes, la figura 44 es el retiro de las planchas de acero inoxidable y la fibra de vidrio para después realizar cortes y juntas de estructura para agrandar la entrada de flujo, figura 45. Asimismo, en la figura 46, se realizó la cubierta del ventilador para evitar accidentes, concentrar el flujo de entrada. En esta reconstrucción de pared, se agrando la entrada de flujo, se tapó la salida original y se dejó espacio a medida para las otras piezas.

Figura 43

Extracción de las partes del diseño original



Figura 44

Retirada de láminas de acero y material aislante



Figura 45

Ampliación de la entrada de flujo para el ventilador



Figura 46

Fabricación de la cubierta del ventilador



Para seguir con la construcción se propuso una nueva ubicación que garantice la máxima radiación, así que se levantó un piso elevado para proteger al secador así que puesto el piso el secador se posicionó en la dirección de este a oeste, considerando que el sol se desplaza desde esos puntos cardinales. Figura 47.

La construcción continua con la instalación del techo, como para mejorar la salida se propuso levantar 10 cm de altura adicional al secador, con ello se realizó un aumento con tubos, seguido el corte de un techo intermedio para después sellar con el techo superior. Figura 48.

Figura 47

Ubicación del piso del secador



Figura 48

Instalación del techo inferior



Continuamos con el trabajo en las piezas de bafles, paredes Venturi, divisores de flujo, se realizó los cortes como indica los planos sin antes realizar unos aumentos para doble de cejas y sirvan para atornillar a las bases del secador. Una vez construido las piezas se encajó las paredes de Venturi y se aisló con fibra de vidrio, después se dobló las curvas de los bafles se cortó a

medida y se instaló en las paredes Venturi. Seguido los divisores de flujo y el panel perforado.
Figura 49, Figura 50 y Figura 51.

Figura 49

Ensamble de las paredes Venturi



La figura 50 presenta la instalación del baffle curvo inferior y baffle curvo superior, este último está ubicado a 100 mm del cajón de entrada y 325 mm del suelo respectivamente, ambos sujetos a la pared de flujo de entrada con tornillos perforante de 8 mm x 1/2 mm, con ello se dividió el flujo hacia arriba y hacia abajo. En las simulaciones es natural que el flujo se concentre un poco más en el inferior de la cámara puesto que no hay existencia de objetos que desvíen las trayectorias del fluido. También se ve zonas con agua debido que este secador se construyó al aire libre y que aún no estaba sellado, así que se produjo filtraciones.

Figura 50

Instalación del baffle curvo inferior y superior



En la figura 51 y 52, nos muestra la instalación del divisor de flujo y el panel perforado respectivamente, aquí el divisor se modificó a cierto grado al mismo sentido de Venturi lo que ayuda mejorar el flujo de aire. Estas piezas son instaladas con tornillo autoperforantes.

Figura 51

Instalación de los divisores de flujo



Figura 52

Instalación de los paneles perforados



Una vez instaladas todas las partes del nuevo sistema de distribución de aire, ventilador y resistencia como se presenta en la figura, se procede a hermetizar el secador para realizar la validación de datos.

3.6 Validación del diseño final

En el siguiente apartado, se llevó a cabo una comparación entre los datos experimentales y los datos simulados de flujo y temperatura correspondientes al diseño implementado en los puntos de estudio adjuntados en la sección apéndice C, según se detalla en la Tabla 11 y la Tabla 12. Para realizar esta comparación, se utilizaron los métodos de regresión lineal BIAS y RMSE, los cuales están explicados en la sección de apéndice. Además, en la Tabla 13 se presenta la humedad relativa en los puntos críticos con la humedad ambiente cuando el secador se encuentra en funcionamiento.

Tabla 11*BIAS y RMSE de la velocidad*

Punto de estudio	BIAS (m/s)	RMSE (m/s)
Punto 1	-0.89	3.44
Punto 2	1.65	6.38
Punto 3	-1.93	7.47
Colector	-0.74	2.89
Salida	0.98	3.81

Tabla 12*BIAS y RMSE de la temperatura*

Punto de estudio	BIAS (°C)	RMSE (°C)
Zona inferior	-0.97	7.11
Zona media	-1.08	9.89
Zona superior	-2.99	9.68

Tabla 13*Humedad relativa en puntos críticos*

Tiempo (s)	Humedad ambiental (%HR)	Humedad en la entrada (%HR)	Humedad en el centro (%HR)	Humedad en el techo (%HR)
0	56	45	52	52
600	54	30.5	38.5	39.5
1200	53	26.5	29.5	30
1800	51.5	23.5	26	25.5
2400	52.5	23.5	24.5	24
3000	54	23	25	25.5
3600	55	23.5	26	25.5

3.6.1 Análisis de la validación

Los valores del sesgo estadístico de la velocidad y la temperatura son menores a 3, lo que indica que los datos se ajustan entre sí, en otras palabras, los datos simulados y experimentales no se encuentran distanciados y desvían significativamente.

La validación de los puntos de estudio para la velocidad en el interior del secado mediante el sesgo estadístico y error cuadrático medio que se muestran en la tabla 11, nos indican que los puntos 2 y 5 son valores sobreestimados, ya que son valores superiores a cero y los puntos 1, 3 y 4 son valores subestimados ya que son menores a cero.

El punto 1 ubicado en la parte inferior el valor de la simulación subestima el valor experimental, dicho en otra manera, el valor experimental es mayor con un error cuadrático medio de 3.44. El punto 2 ubicado en el centro del ventilador el valor de la simulación sobreestima los valores experimentales, es decir, el valor simulado es mayor y su error cuadrático medio es 6.38. Para el punto 3 ubicado en la malla metálica el valor de la simulación subestima el valor experimental, por ende, el valor experimental es mayor con un error cuadrático medio 7.47. El punto 4 ubicado en la entrada del colector los valores simulados subestiman los valores experimentales, con un error cuadrático de 2.89. En el punto 5 ubicado en el flujo de salida la velocidad simulada sobreestima los valores experimentales, con un error cuadrático medio de 3.81.

Analizando la tabla 12, los valores de temperatura son subestimados donde se evidencia un error en el límite para rango de aceptación, dichos valores son altos, porque en la simulación no experimenta pérdidas por el tipo de hermetizado de la cámara y variación de cambios meteorológicos como la temperatura del flujo de entrada y radiación.

. En la tabla 13 se visualiza la humedad relativa cuando el secador se encuentra en operación en la parte inferior, media y superior del secado. Los primeros 600 segundos corresponden al periodo de precalentamiento, durante el cual la humedad se reduce. En el

intervalo que va desde los 600 hasta los 1800 segundos, la humedad continúa disminuyendo, alcanzando un máximo del 26% HR. Finalmente, a los 1800 segundos, se inicia el tiempo de estabilización con una variación máxima de 1.5% HR.

La validación se basa en los datos medidos por el software y experimentados con cuatro termómetros en el secador y con la radiación solar en el mismo momento. Los resultados medidos en SolidWorks y experimentados manualmente se encuentran en la sección de Apéndice. Los cuales detallan el funcionamiento del secador con los parámetros de temperatura y humedad en los puntos de entrada, media y en la altura del techo dentro del secador, cabe recalcar que el tiempo de funcionamiento no empezó de inmediato, sino que empezó a los 1800 segundos aproximadamente, debido a que se tuvo que programar el instrumento e instalar en el secador.

La graficas de Apéndice C, muestra una rápida crecida de la temperatura llegando a los valore establecidos para el secado y deshumidificando como muestran en cada punto de medición. El grado de deshidratación dependerá del tipo de grano que se encuentre dentro del secador. La radiación solar también fue un factor importante en el equipo ya que con los materiales construidos se permitió una adición de calor dentro del secador, pero en ese momento su intensidad no fue estable debido a que nublo por la temporada. Así también, a la puesta a prueba de una hora y más se tuvo que desconectar por precaución ya que aun las tomas de energía no están adecuadas.

3.7 Análisis de costos

A continuación, se detallan los costos asociados a la adecuación del secador solar tipo invernadero destinado para el proceso de secado de granos. Estos costos experimentan una disminución gracias a la contribución de componentes proporcionados por el cliente, así como el

uso de materiales reciclados adaptados específicamente para el funcionamiento del secador, donde se presentan en la tabla 14.

Tabla 14

Componentes y materiales otorgados por el cliente

N°	Descripción	Especificación	Cantidad
1	Ventilador industrial	Voltaje 110 V de 30 W	1
2	Resistencia térmica	Potencia de 4400 W	1
3	Plancha de policarbonato	2880 mm x 1800 mm	1
4	Acero estructural	1 pulgada	3
5	Malla de protección	1 m x 1m	1
6	Muro Trombe	1440 mm x 1270 mm	1

3.7.1 Costos de materia prima y consumibles

En la tabla 15 se encuentra los costos detallados de los materiales y consumibles que se utilizaron durante la adecuación del secador. Esta misma está relacionada con los valores estándar del comercio actual, sin mencionar que el proyecto redujo materiales del secador original. Cabe mencionar que los materiales fueron seleccionados con un material que accesible y que tenga las propiedades mecánicas apropiadas para mecanizar en frío, tales como el corte, plegado, perforado para las piezas de ensamble.

Tabla 15*Materia prima y consumibles*

Descripción	Cantidad	Valor unitario	Valor total
Planchas de acero galvanizado	2	\$43.00	\$86.00
Caja de 100 tornillos perforantes 8 mm x 1/2 mm	2	\$1.05	\$2.10
Caja de 100 tornillos perforantes 1 1/2 in x 1/2 mm	1	\$5.00	\$5.00
Adaptador para copa	1	\$6.31	\$6.31
Sierra de copa bimetálica de 38 mm	1	\$4.93	\$4.93
Silicona	5	\$3.30	\$16.50
Pintura negra de 1 galón	1	\$17.50	\$17.50
Diluyente de un galón	1	\$7.50	\$7.50
Lijas	2	\$0.50	\$1.00
Discos de corte	5	\$1.50	\$4.50
Disco de zirconio	3	\$1.80	\$5.40
Disco de desbaste	2	\$1.50	\$3.00
Marcador	2	\$0.70	\$1.40
Funda de soldadura de 1 kg	2	\$3.00	\$6.00
Juego de bisagras	4	\$0.75	\$3.00
Terminales de resistencias niquelados	4	\$0.70	\$2.80
Total			\$172.94

3.7.2 Costos de mano de obra y mecanizado

A continuación, en la tabla 16, se explica a detalle los costos de mano de obra que pertenecen a los diferentes trabajos realizados a la adecuación. Donde estas operaciones son de corte, pulido, perforado, soldadura, pintura entre otras actividades necesarias. Además, la tabla 17 presenta los costos ejecutados por servicios externos debido a la falta de implementos para dichas actividades.

Tabla 16*Costos de mano de obra y mecanizado*

Descripción	Operación	Costo	Tiempo total	Valor total
Pared de flujo de entrada	Corte	\$3.75	16	\$60.00
	Soldadura			
	Instalación			
Techo intermedio	Trazo	\$3.75	2	\$7.50
	Corte			
	Instalación			
Aumento de altura del secador en el techo	Corte	\$3.75	7	\$26.25
	Perforado			
	Soldadura			
Preparación de piso	Recolección tierra	\$3.75	4	\$15.00
	Nivelación			
	Compactación			
Panel perforado superior	Pintado	\$3.75	4	\$15.00
	Perforado			
	Instalación			
Pared Venturi	Corte	\$3.75	3	\$11.25
	Doblado			
	Pulido			
	Instalación			
Divisor de flujo	Corte	\$3.75	4	\$15.00
	Doblado			
	Instalación			
Piso	Corte	\$3.75	10	\$37.50
	Pintado			
	Pulido			
	Soldadura			
Ventilador	Corte	\$3.75	6	\$22.50
	Pulido			
	Soldadura			
	Instalación			
Resistencias térmicas	Instalación	\$3.75	4	\$15.00
	Adecuación			
	Soldadura			
Puertas	Instalación	\$3.75	3	\$11.25
	Soldadura			
Total				\$236.25

Tabla 17

Trabajos externos

Descripción	Cantidad	Valor unitario	Valor total
Plegado de baffle superior	1	\$23.00	\$23.00
Plegado de baffle inferior	1	\$13.00	\$13.00
Total			\$26.00

3.7.3 Costo total del proyecto

El costo total de la adecuación del secador tipo invernadero para el secado de grano consta de la suma de los costos de materia prima y consumibles, trabajos externos, mano de obra y diseño ingenieril que se especifican en la tabla 18.

Tabla 18

Costo total del proyecto

Descripción	Valor
Costo de materiales y consumibles	\$172.94
Costos de mano de obra	\$236.25
Trabajos externos	\$26.00
Subtotal	\$435.19
Costo de diseño ingenieril (33%)	\$143.61
Total, del proyecto	\$578.80

Capítulo 4

4.1 Conclusiones y recomendaciones

En esta sección, se presentan y detallan las conclusiones sobre la idoneidad del secador tipo invernadero para el proceso de secado de granos. Asimismo, se incluyen recomendaciones con el objetivo de identificar opciones mejoradas y obtener resultados más satisfactorios para investigaciones futuras.

4.1.1 Conclusiones

Se habilitó el secador solar tipo invernadero para el secado de granos con la incorporación de un sistema de distribución de aire caliente que impide la concentración del flujo en unas zonas específicas dentro del área de la cámara, lo que resulta en una mejora significativa en la eficiencia y recortando los tiempos necesarios para completar el secado como los costos asociados con la producción. Además, en el interior del secador se alcanzó una temperatura máxima de operación de 59.5°C con una humedad de 23%HR, valor que se encuentra dentro del rango establecido.

La adecuación del secador solar tipo invernadero se sustentó en el método de Dinámica de Fluidos Computacional que permitió llevar a cabo un análisis de velocidad, temperatura y presión del aire, para la creación y evaluación de diversas alternativas, donde estas propuestas redujeron costos de materia prima, implementación y mano de obra.

Las modificaciones realizadas del diseño simulado mejoraron significativamente las velocidades del aire en la cámara de secado. La disminución de trayectoria de salida de flujo provocó un aumento de presión otorgando una distribución uniforme en el interior del secador, siendo este parámetro el más importante para el diseño del secador.

La reutilización del muro Trombe en la construcción de la pared difusora, junto con el uso de un ventilador y materiales reciclados, ha permitido reducir de manera considerable los costos asociados al proyecto. Esta estrategia se presenta como económicamente factible para llevar a cabo la adaptación del equipo.

En este secador, se aprecia un incremento en la radiación solar a través de las paredes de plástico. Aunque esto resulta beneficioso, es imprescindible analizar la pérdida de calor por conducción a través de dichas paredes. Dada la diferencia de temperatura, la radiación puede compensar esta pérdida, aunque no en todos los casos, ya que todo depende de las condiciones climáticas.

Los resultados varían estrechamente con las condiciones ambientales lo que significa que el rango de operación del secador tipo invernadero puede verse afectado. Por otro lado, la radiación, provoca un aumento de temperatura por absorción en el techo, esto evidencia el aprovechamiento de calor por radiación y también puede variar dependiendo de las condiciones ambientales.

Dado los valores bajos de BIAS y valores altos en RSME, el modelo del secador indica que los valores tienden a sesgar positivamente, pero con predicciones generalmente precisas. Donde el único parámetro que indica una precisión no tan confiable es en la temperatura, ya que existen filtraciones por las paredes del secador y condiciones meteorológicas no favorables.

4.1.2 Recomendaciones

Se recomienda analizar la separación entre los niveles de las bandejas, las cuales deben tener dimensiones diversas para lograr una distribución más eficiente del flujo de aire. Esto asegurará una eliminación homogénea de la humedad, garantizando así la calidad del proceso de secado.

Analizar el número de entradas del colector de un secador es fundamental para garantizar la eficiencia de secado. Este análisis permite optimizar una distribución uniforme del flujo estable, provocando que el proceso sea más factible. Además, el sobredimensionamiento y un mayor recorrido del flujo en un colector ocasiona caídas de presión.

Al implementar la construcción de cualquier modelo simulado, variar los parámetros como de salida flujo, posicionamiento de los baffles y divisores de flujo, para visualizar como

cambian los parámetros de análisis. Este diseño simulado sirve como base para proponer soluciones que mejoren los resultados obtenidos.

Al trabajar con ventiladores en secadores, es preferible colocar una malla de protección en la entrada de este para evitar el aumento de presión y no afectar en su rendimiento y la distribución del flujo.

Con el objetivo de llevar a cabo una investigación más exhaustiva sobre este equipo, proponemos realizar una simulación que involucre las estanterías del producto. Esta simulación permitirá analizar detalladamente el comportamiento renovado y la distribución del flujo, proporcionando una perspectiva más profunda para evaluar su eficacia y optimizar su rendimiento.

Debido a que la absortividad del policarbonato es variable, ya que depende de diversas condiciones ambientales, como el color, el espesor, el estado de la superficie, entre otros factores, se sugiere realizar mediciones directas de la radiación que atraviesa el techo y las paredes para evitar posibles errores de cálculo. Es importante tener en cuenta que la radiación puede afectar de manera diferente las distintas caras del secador.

Referencias

- Corporation, S. (1 de Julio de 2012). *SolidWorks*. (M. B. Charlès, Editor, D. Systèmes, Productor, & Dassault Systèmes) Obtenido de SolidWorks:
<https://www.solidworks.com/es/product/solidworks-flow-simulation>
- Delgado, E. (25 de octubre de 2020). *MDPI*. Obtenido de MDPI: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/21/7497>
- Francisco J. Barrera-Ríos, S. A.-L.-Á.-T.-Á. (5 de Julio de 2021). Mecanismos de transferencia de calor. *TEPEXI Boletín Científico de la Escuela Superior Tepeji del Río*, 5.
doi:<https://doi.org/10.29057/estr.v8i16>
- Freire Sánchez, C. A., & León Maisincho, A. E. (2023). *Rediseño de un secador rotatorio para granos*. Guayaquil: ESPOL.
- Garduño, A. (28 de agosto de 2020). *Scielo*. Obtenido de Scielo:
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-40262017000100019&script=sci_arttext&tlng=es
- Heldman, R. P. (2014). *Introduction to Food Engineering* (Quinta edición ed.). Lincoln, Nebraska, Estados Unidos: ELSEVIER.
- Marques, A. (1993). *Organizacion de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación*. (C. Arias, Ed.) Obtenido de Organizacion de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación: <https://www.fao.org/3/x5027s/x5027S00.htm#Contents>
- Moreno, R. G. (16 de mayo de 2013). *Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*. (R. G. Moreno, Ed.) Obtenido de Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo:
<https://fim.umich.mx/teach/rguerrero/notas/Capitulo%20de%20Transferencia%20de%20calor.pdf>
- Organization, F. a. (n.d. de n.d. de n.d.). *Food and Agriculture Organization*. Obtenido de Food and Agriculture Organization: <https://www.fao.org/3/x5027s/x5027S05.htm>

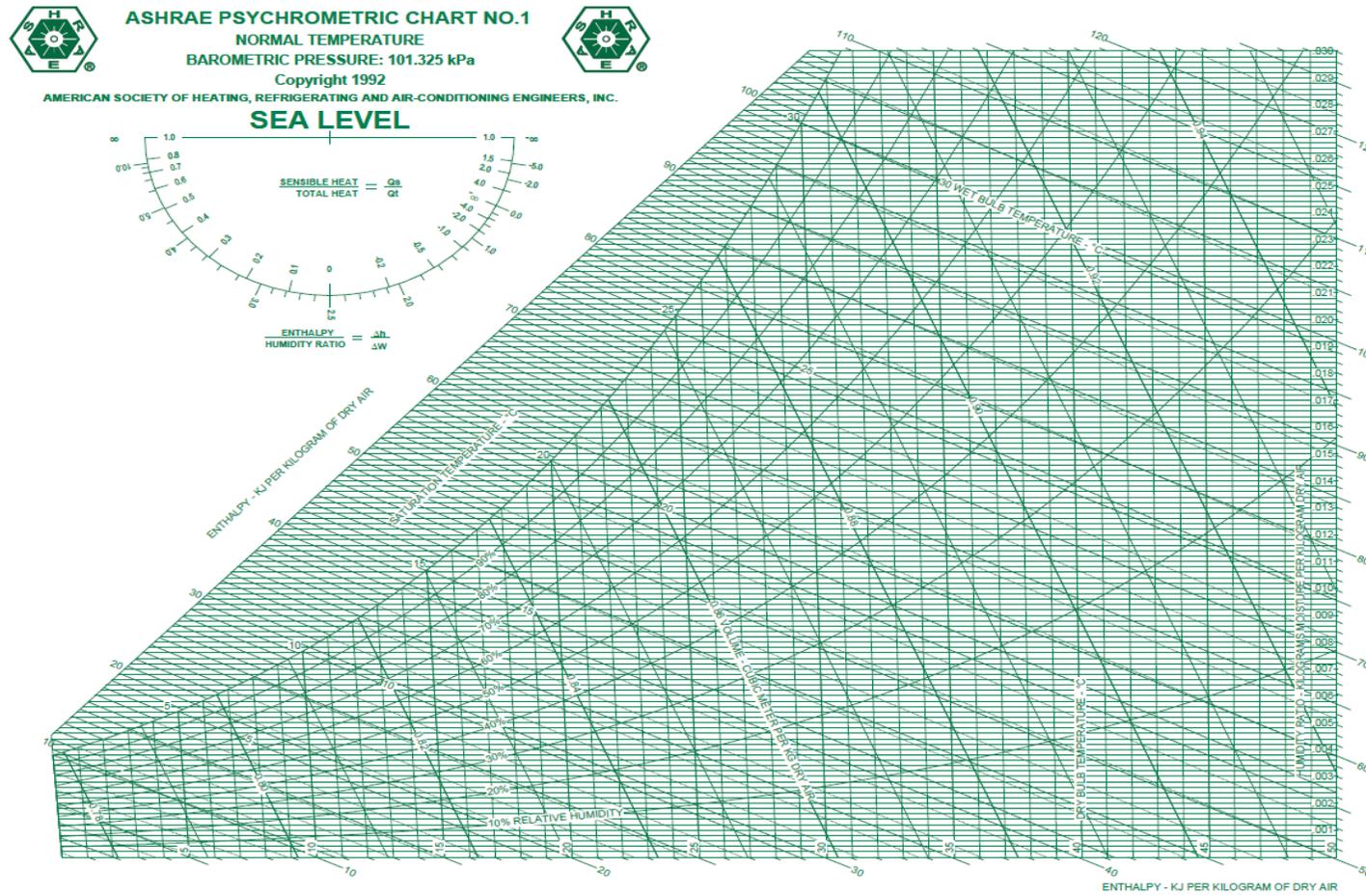
Puertas, I. M. (noviembre de 2005). Modelo y construcción de un secadero solar híbrido para residuos biomásicos. (U. d. Publicaciones, Ed.) Extremadura, Badajoz, España. Obtenido de <https://docplayer.es/19497816-Modelado-y-construccion-de-un-secadero-solar-hibrido-para-residuos-biomasicos.html>

Lizarazo, M. (abril de 1983) *El secado de los Granos*. Obtenido de Instituto Interamericano de Cooperación para la agricultura:

Apéndices

Apéndice A

Figura A1. Carta psicrométrica en sistema internacional



Apéndice B

Resultados de la simulación de la solución

Figura B1. Cut plot de velocidad de la solución a 1200 segundos

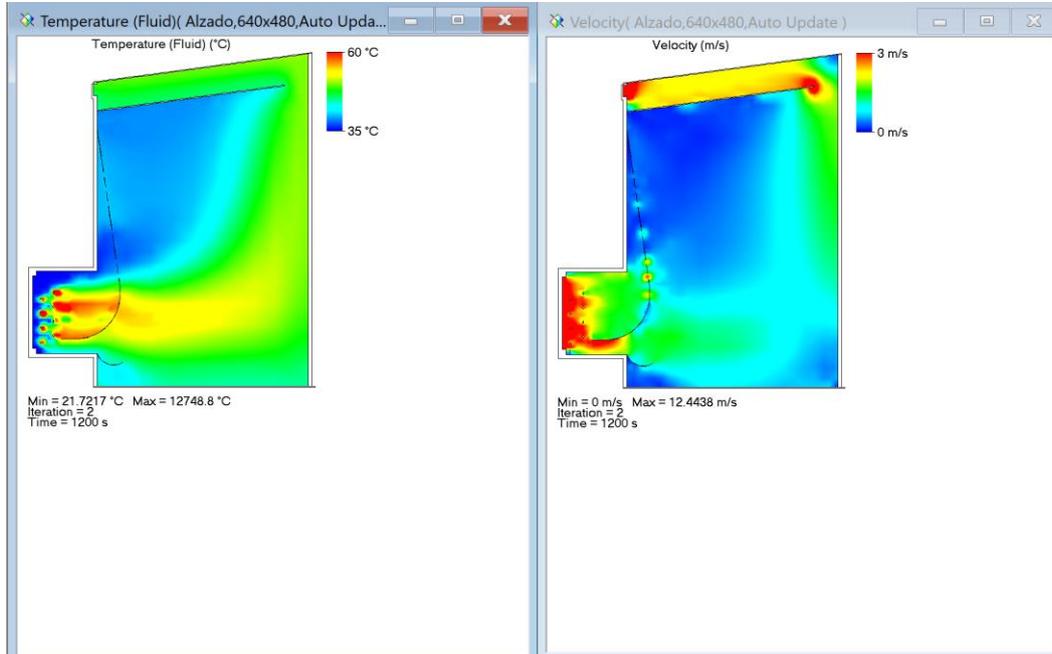


Figura B2. Cutplot de velocidad de la solución a 2400 segundos

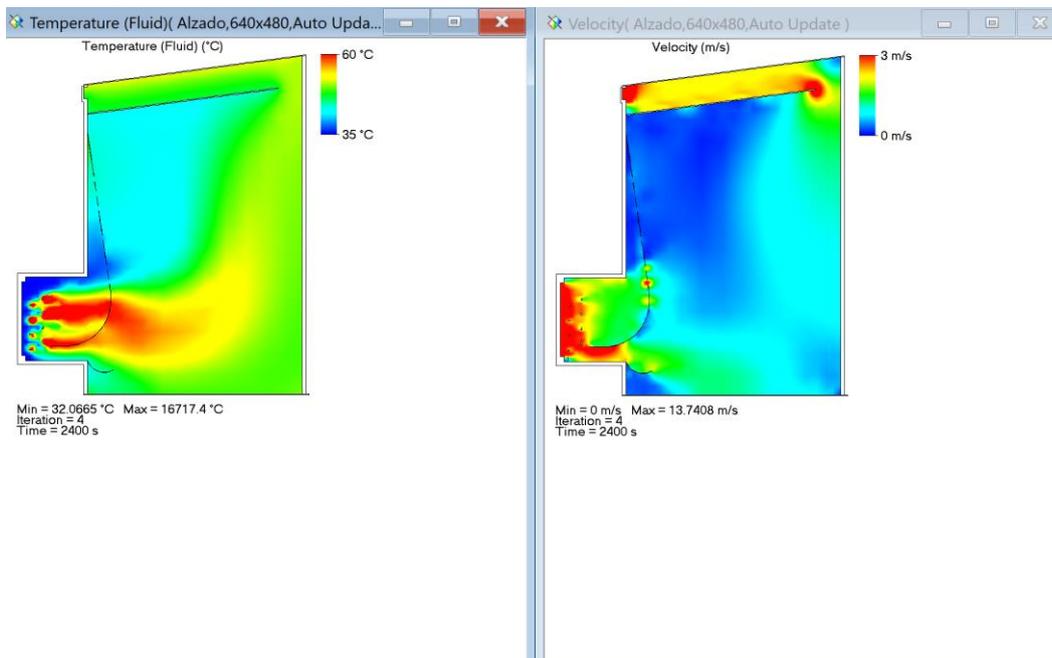


Figura B3. Cut plot de velocidad de la solución a 4200 segundos

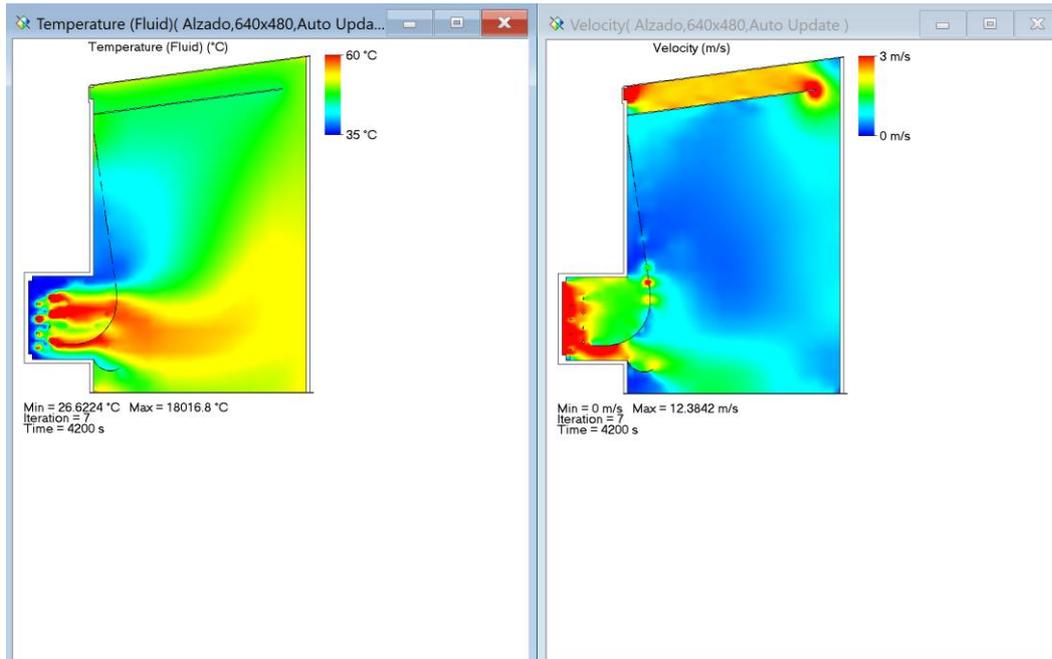


Figura B4. Cut plot de velocidad de la solución a 6000 segundos

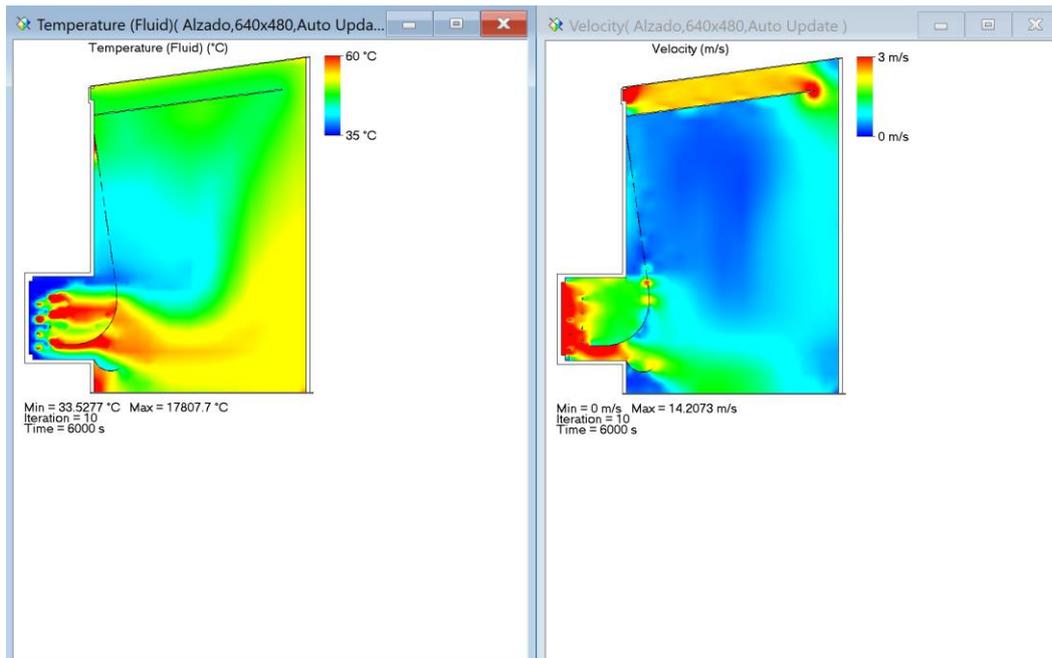


Figura B5. Cut plot de velocidad de la solución a 8400 segundos

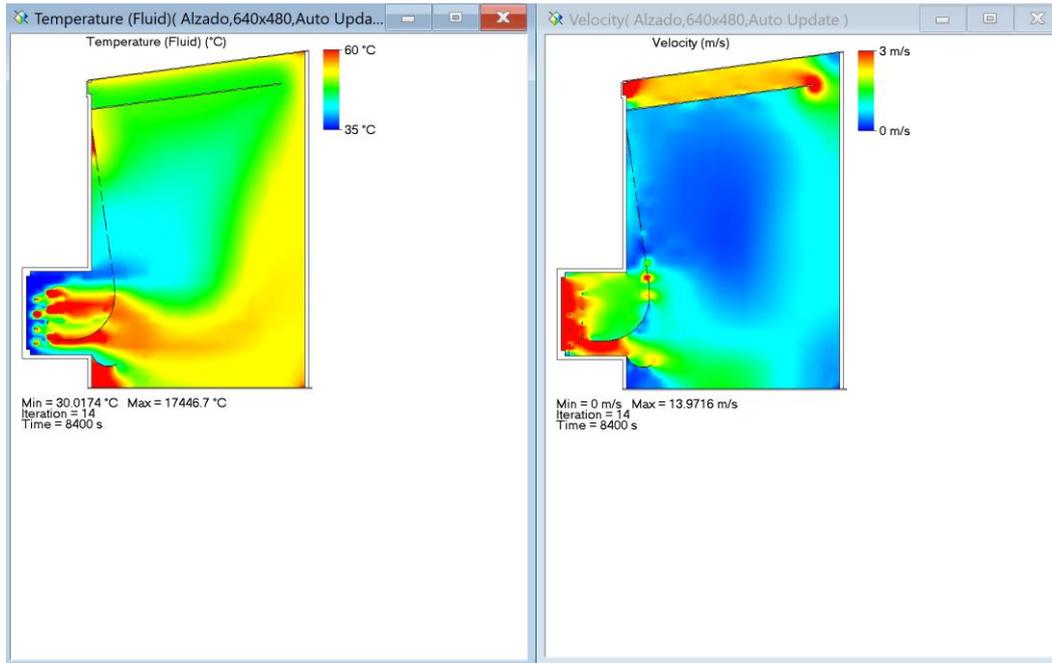


Figura B6. Cut plot de velocidad de la solución a 9000 segundos

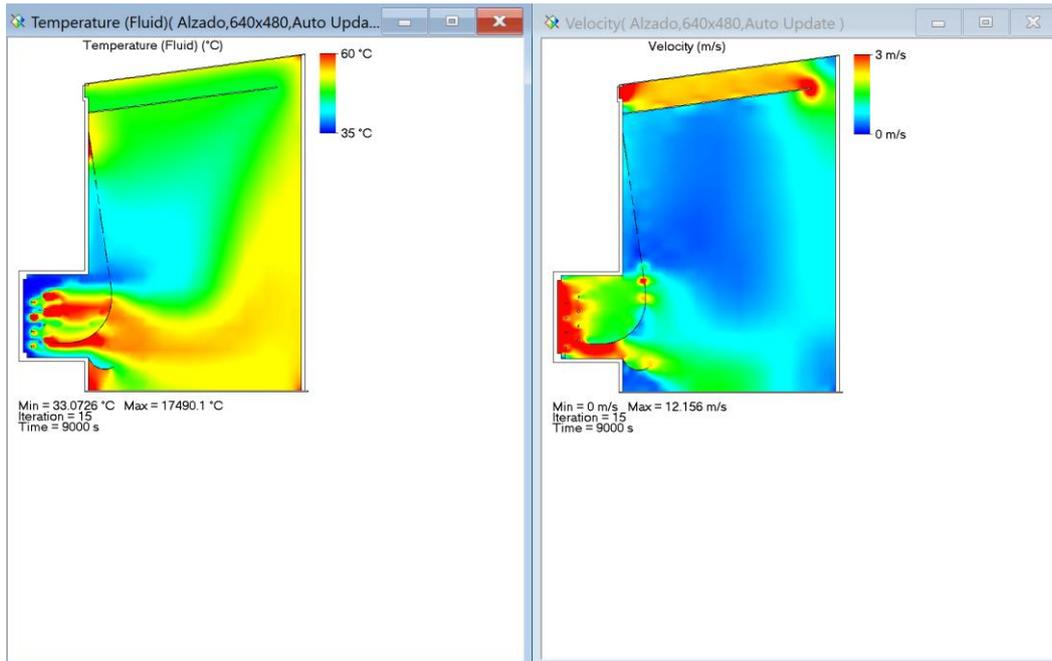


Figura B7. Cutp lot de velocidad de la solución

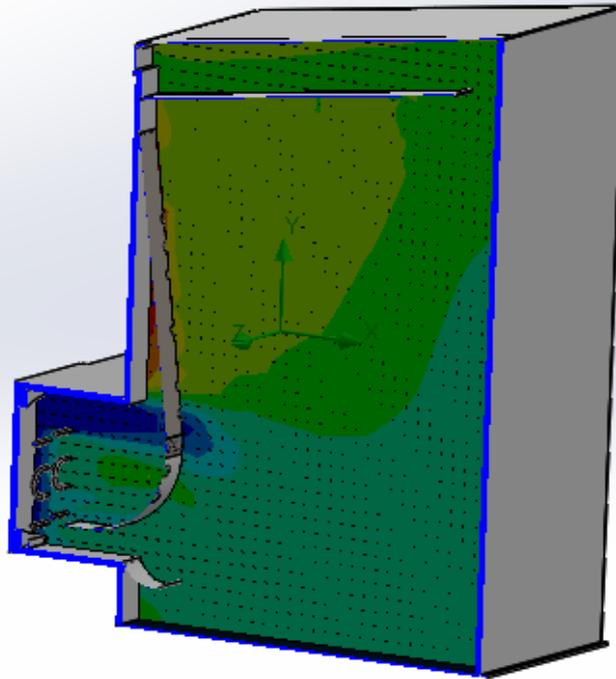
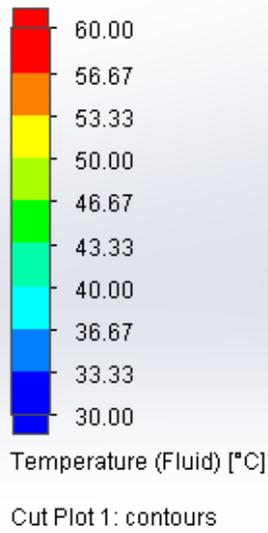
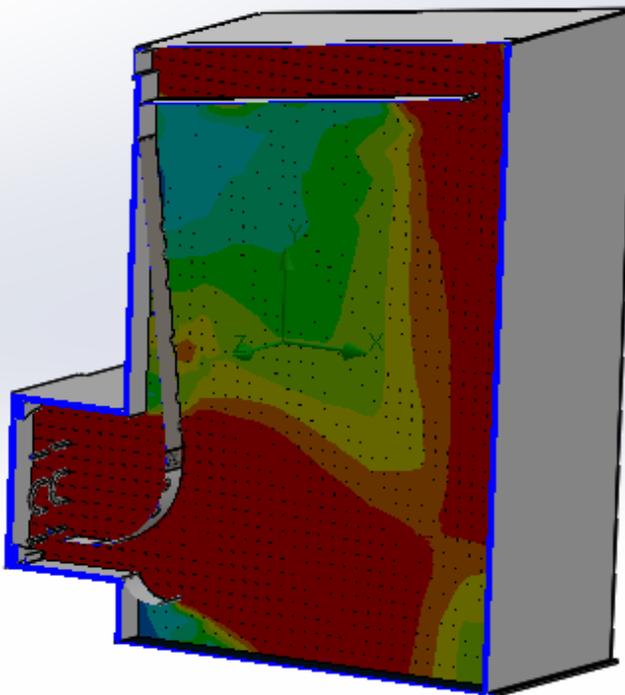
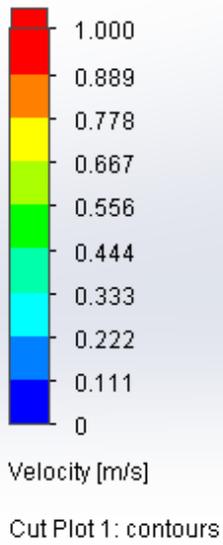


Figura B8. *Cut plot de la temperatura de la solución*



Apéndice C

Validación de parámetros

La validación del funcionamiento del equipo se comparó los datos obtenidos de manera simulada y experimental en los mismos intervalos de tiempo, por lo cual se utilizó dos métodos de regresión lineal llamado RMSE (Error cuadrático medio) y BIAS (sesgo estadístico) que sirve para identificar la cercanía de la línea de ajuste que nos permite conocer la diferencia del valor simulado y experimental. Usando dichas regresiones, se calculó los errores de la velocidad para 15 toma de datos y 7 toma de datos para la temperatura.

Tabla C1. *Datos simulados de la velocidad*

Tiempo (s)	Velocidad en el punto 1 (m/s)	Velocidad en el punto 2 (m/s)	Velocidad en el punto 3 (m/s)	Velocidad en el colector (m/s)	Velocidad en la salida 5 (m/s)
0	0.85	2.75	0.66	1.88	3.64
600	1.18	3.67	0.33	2.04	3.79
1200	1.48	3.72	0.36	2.03	3.88
1800	1.51	3.59	0.30	2.11	3.74
2400	1.55	3.80	0.79	1.96	3.73
3000	1.71	4.01	0.50	1.83	3.79
3600	1.67	4.02	0.33	1.78	3.84
4200	1.76	4.12	0.62	1.75	3.83
4800	1.72	4.21	0.38	1.87	3.82
5400	1.80	4.13	0.45	1.75	3.76
6000	1.77	4.30	0.37	1.89	3.85
6600	1.79	4.17	0.44	1.80	3.80
7200	1.77	4.33	0.38	1.87	3.81
7800	1.80	4.19	0.39	1.79	3.79
8400	1.80	4.38	0.43	1.86	3.82

Tabla C2. *Datos experimentales de la velocidad*

Tiempo (s)	Velocidad en el punto 1 (m/s)	Velocidad en el punto 2 (m/s)	Velocidad en el punto 3 (m/s)	Velocidad en el colector (m/s)	Velocidad en la salida 5 (m/s)
0	2.5	2.31	2.38	2.62	2.81
600	2.5	2.31	2.38	2.62	2.81
1200	2.5	2.31	2.38	2.62	2.81
1800	2.5	2.31	2.38	2.62	2.81
2400	2.5	2.31	2.38	2.62	2.81
3000	2.5	2.31	2.38	2.62	2.81
3600	2.5	2.31	2.38	2.62	2.81
4200	2.5	2.31	2.38	2.62	2.81
4800	2.5	2.31	2.38	2.62	2.81
5400	2.5	2.31	2.38	2.62	2.81
6000	2.5	2.31	2.38	2.62	2.81
6600	2.5	2.31	2.38	2.62	2.81
7200	2.5	2.31	2.38	2.62	2.81
7800	2.5	2.31	2.38	2.62	2.81
8400	2.5	2.31	2.38	2.62	2.81

Tabla C3. *Datos simulados de la temperatura*

Tiempo (s)	Velocidad en el punto 1 (m/s)	Velocidad en el punto 2 (m/s)	Velocidad en el punto 3 (m/s)
0	40.72	41.14	40.47
600	51.34	50.76	50.37
1200	54.97	55.45	52.82
1800	50.87	53.73	54.29
2400	51.79	54.56	53.74
3000	51.92	53.62	53.08
3600	53.63	52.77	52.29

Tabla C4. *Datos experimentales de la temperatura*

Tiempo (s)	Velocidad en el punto 1 (m/s)	Velocidad en el punto 2 (m/s)	Velocidad en el punto 3 (m/s)
0	39.5	37.5	39
600	48.5	47	49.5
1200	53	53.5	55
1800	55	57.5	59.5
2400	55.5	58.5	59.5
3000	55.5	58	58
3600	55	57.5	57.5

Graficas de Datos Experimentados dentro del secador y con la radiación del día 1 febrero del 2024.

Figura C1. Radiación Solar

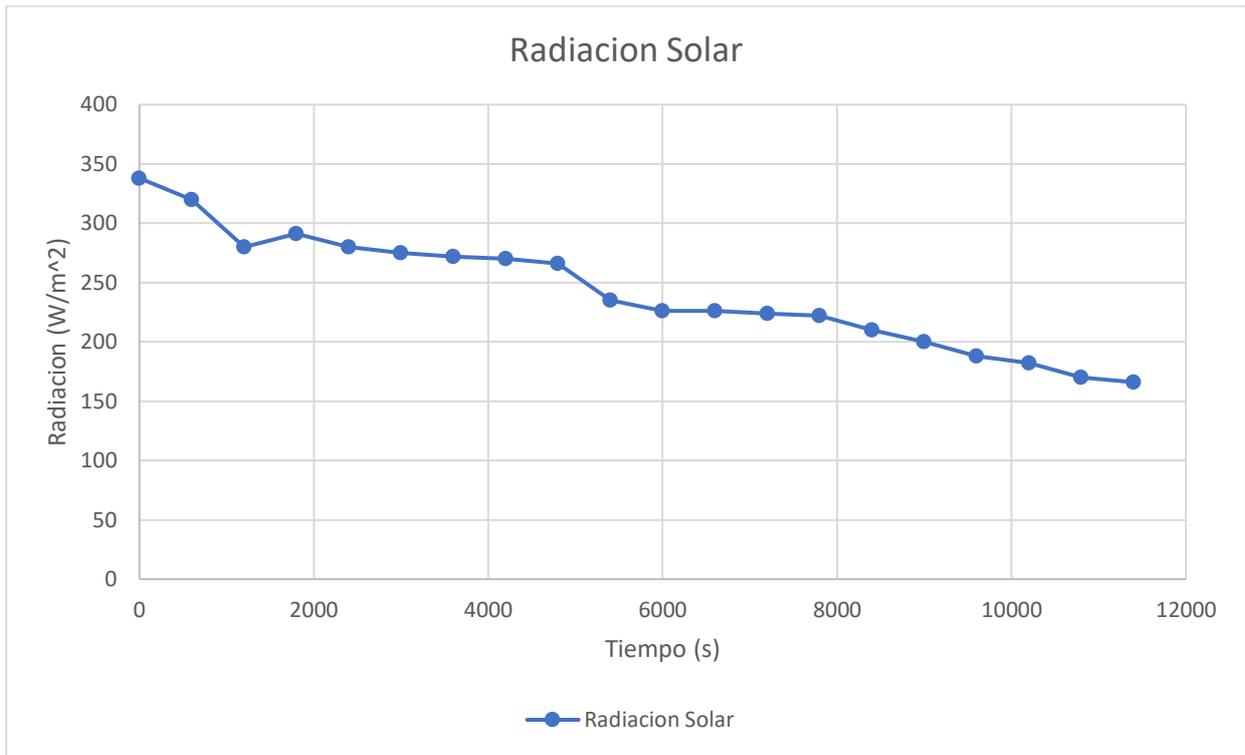


Figura C2. Datos Experimentales del punto Entrada de Aire

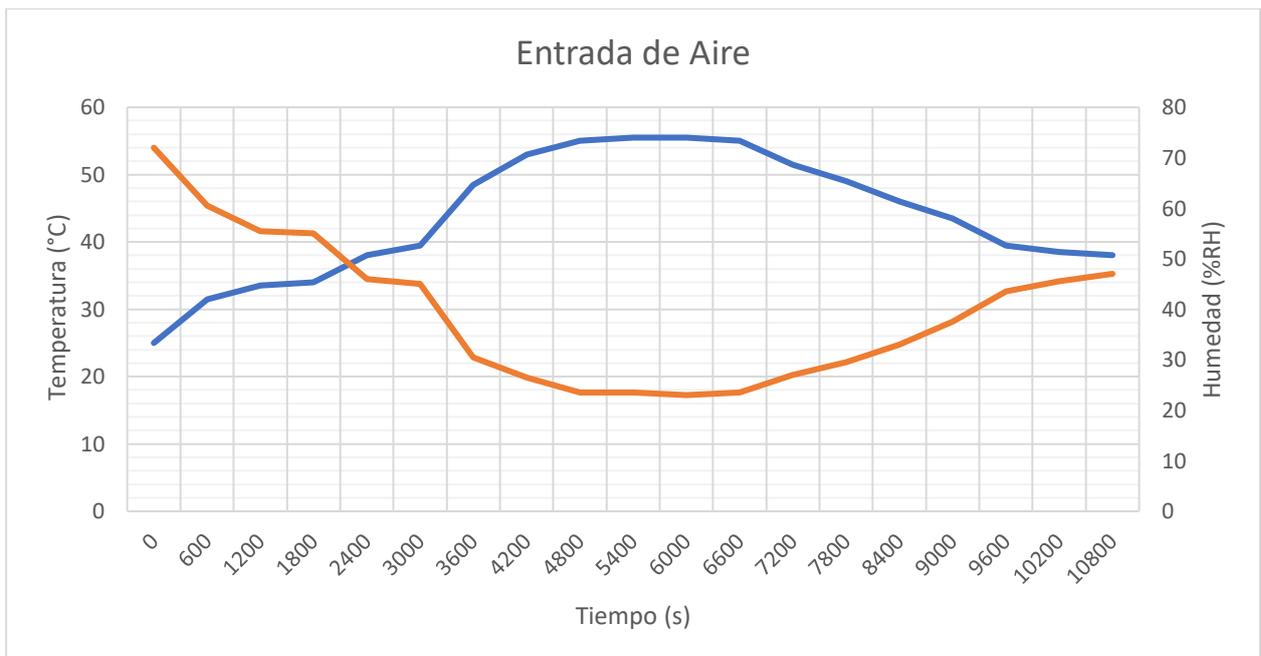


Figura C3. Datos Experimentales de Punto Medio del Secador

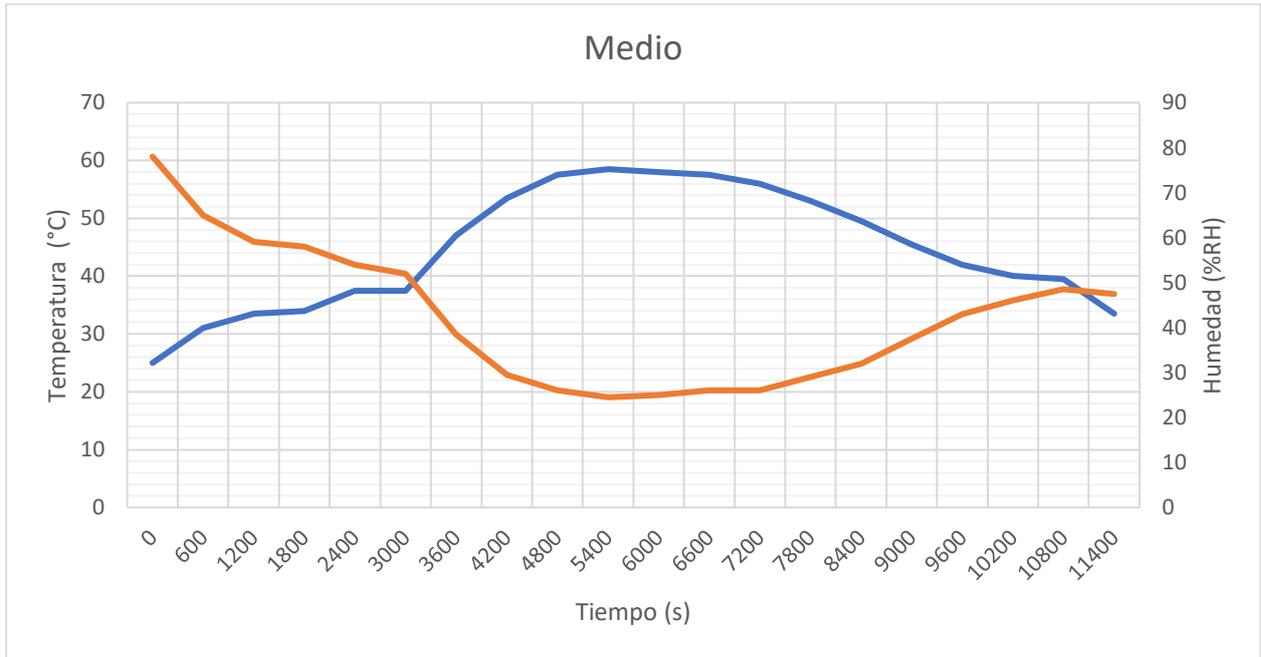


Figura C4. Datos Experimentales del punto en el Techo

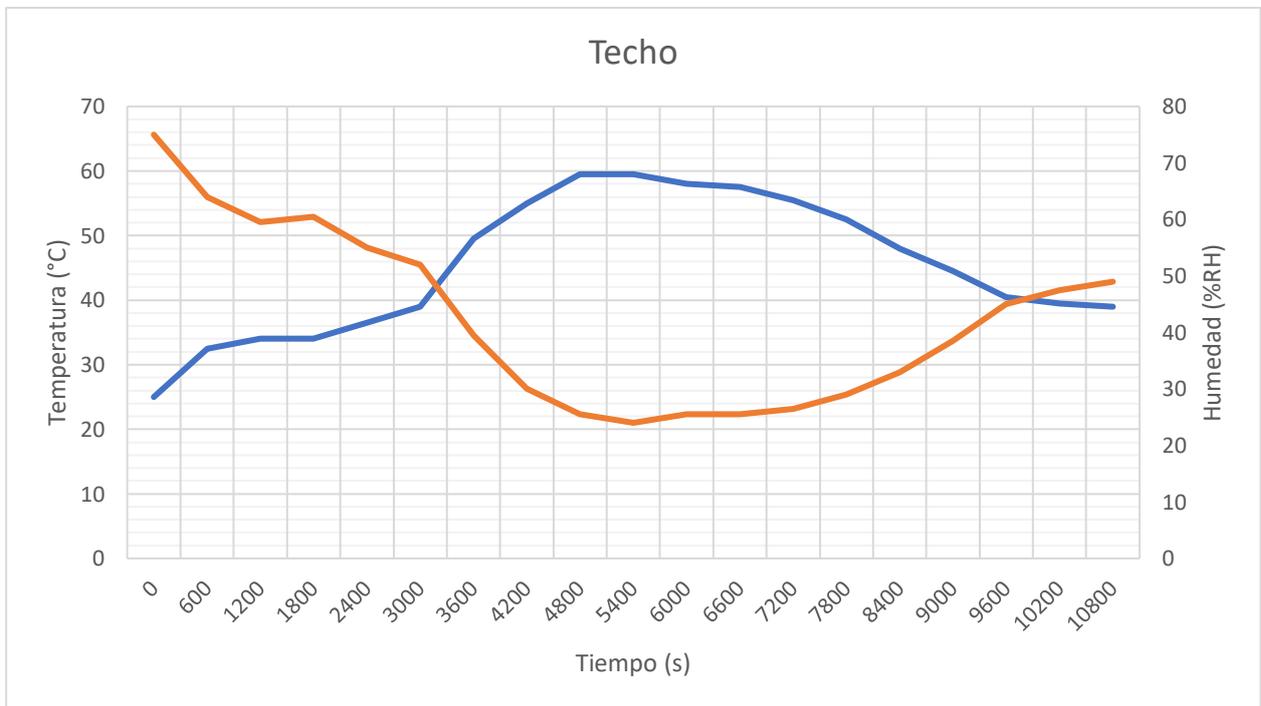
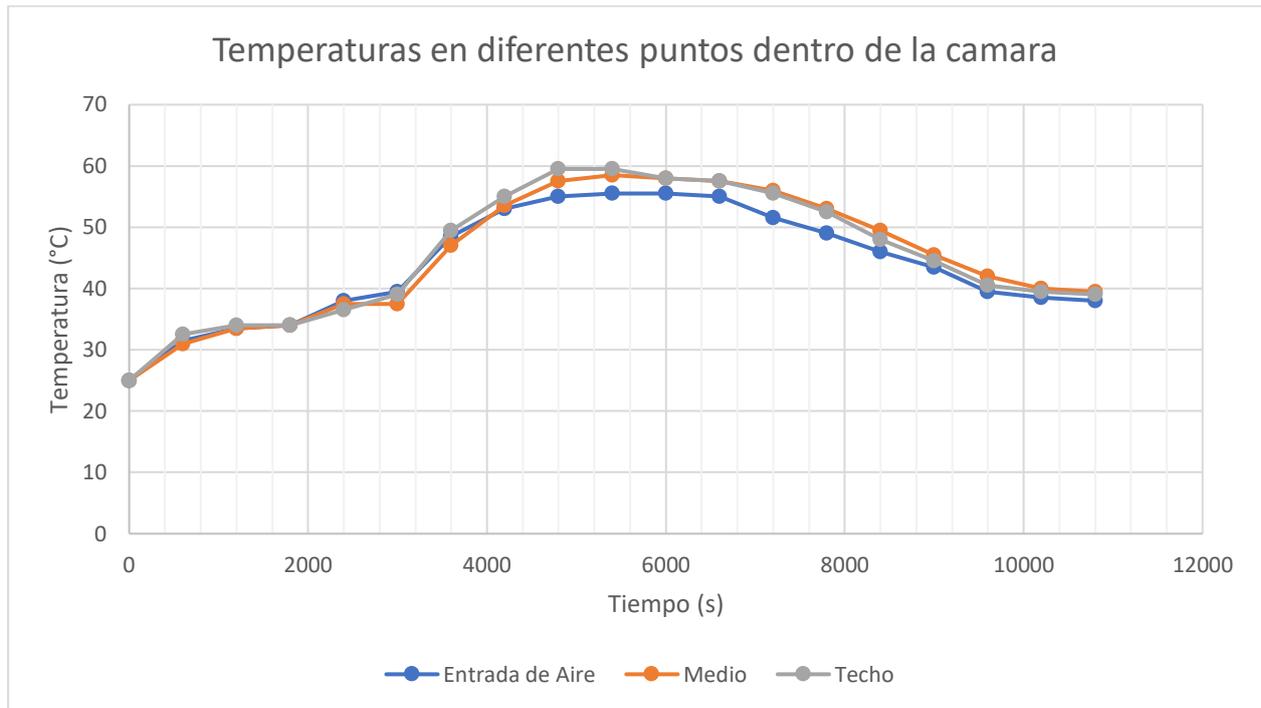


Figura C5. Comparación de los Datos Experimentales en los tres puntos al mismo tiempo



Punto 1

Velocidad

$$BIAS = \frac{\sum V_{simulada} - V_{experimental}}{N}$$

Donde:

$V_{simulada}$ = Velocidad simulada

$V_{experimental}$ = Velocidad experimental

N = Número de toma de datos

$$BIAS = \frac{\sum V_{simulada} - \sum V_{experimental}}{N}$$

$$BIAS = \frac{(19.85 - 37.5) \frac{m}{s}}{15}$$

$$BIAS = -1.17$$

$$RMSE = \sum \sqrt{\frac{(V_{simulada} - V_{experimental})^2}{15}}$$

$$RMSE = 4.55$$

Zona inferior

Temperatura

$$BIAS = \frac{\sum T_{simulada} - T_{experimental}}{N}$$

Donde:

$T_{simulada}$ = Temperatura simulada

$T_{experimental}$ = Temperatura experimental

N = Número de toma de datos

$$BIAS = \frac{\sum T_{simulada} - \sum T_{experimental}}{7}$$

$$BIAS = \frac{(355.22 - 362)^{\circ}C}{7}$$

$$BIAS = -1.17$$

$$RMSE = \sum \sqrt{\frac{(T_{simulada} - T_{experimental})^2}{15}}$$

$$RMSE = 7.11$$

Apéndice D

Perdidas por Paredes

Como la cámara de secado se establece en una temperatura promedio de 55°C y la temperatura exterior ronda los 35°C, entonces por propiedades del policarbonato se obtiene:

$k = 0,189$ W/mK, conductividad térmica de la pared de policarbonato

$A = 8,87$ m², area del policarbonato

$L = 6$ mm, es el espesor de del policarbonato

$$Q = \frac{A * k * \Delta T}{L}$$

Calor por radiación

T_s , Temperatura de las paredes de 40°C medido antes de ingresar flujo

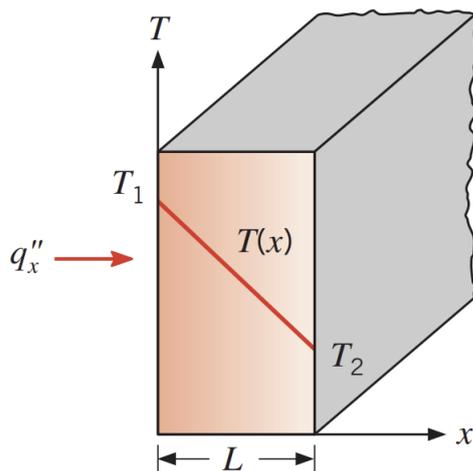
T_{∞} , Temperatura de alrededores de 35 C

$$Q_{rad} = A(\alpha G - E) = A(\alpha G - \epsilon \sigma T^4) = A(\epsilon \sigma (T_s^4 - T_{\infty}^4))$$

$$Q_{rad} = 8,87((0,9)(5,67 \times 10^{-8})((40 + 273)^4 - (35 + 273)^4))$$

$$Q_{rad} = 271.01 \text{ W}$$

Figura D1. Diagrama de transferencia de calor por conducción



$$Q = \frac{A * k * \Delta T}{L} = \frac{8,87(0,189)(55 - 35)}{0,006}$$

$$Q = 5588.1 \text{ W}$$

Consumo energético

Costo por kW/h en la CNEL de Ecuador de \$ 0,104

- 2 Resistencias de 4000 W
- $t = 4.24$ horas, tiempo de secado

Consumo energético de Secador solar tipo invernadero = $(8\text{kW})(4.24\text{h}) = 33.92 \text{ kWh}$

Costo de consumo energético del secador que tomaría a tiempo de secado, con relación a la tarifa actual:

$$\text{Costo de consumo con secador solar tipo invernadero} = 33.92 \text{ kWh} \left(0.104 \frac{\$}{\text{kWh}} \right) = \$3.52$$

Valor adicional como ganancia o como valores agregados \$25

$$\text{Costo de Secado con secador tipo invernadero} = \$3.52 + \$25 = \$28.52$$

SECADORA A GAS NATURAL

Un secador de granos a gas natural de SIRCA, tiene un consumo aproximado de 4 kg/h de combustible, y sabiendo que el costo de gas es de kilogramos de combustible:

$$\text{kg consumo GLP} = 4.24 \left(4 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = 16.96 \text{kg}$$

Según el ministerio de hidrocarburos el gas licuado de petróleo está a 0.107 \$/kg, este valor puede variar dependiendo de costos de logística, demanda, IVA, etc.

$$\text{\$ Costo de consumo} = 16.96 \text{ kg} \left(0.107 \frac{\text{\$}}{\text{kg}} \right) = \$ 1.81$$

El costo de secado con GLP varía, dependiendo de los subsidios, el pago a personal, transporte, ganancia, etc. Sin embargo, se sostiene el mismo valor de secador solar invernadero de \$25 para comparar.

$$\text{\$ Costo de Secado con GLP} = \$1.81 + \$25 = \$ 26.81$$

La diferencia entre secadoras no es mucha, pero hay otros motivos por los cuales se debe seleccionar un secador con fuente eléctrica.

Tabla D1. Comparación de secador con GLP y el secador solar tipo invernadero

	Secador Solar tipo Invernadero	Secador con GLP
Consumo energético	0.9 kWh calor por radiación, puede reducir el consumo a medida que la radiación incrementa su intensidad, o la vez disminuir el tiempo de secado.	4 kg/h GLP, consumo ya establecido por fabricante, este puede variar pero no significativamente.
Mantenimiento	Mantenimiento preventivo	Mantenimiento correctivo

	20% presupuesto.	80% presupuesto.
Operación	Puede trabajar innterrumpidamente.	Interrumpida por cambios de cilindros, chequeos de presión, flujo, etc.
Instalación	Las conecciones son fáciles y pérdidas insignificativas de corriente.	Difícil al manipular gas.
Costos de consumo a mismo tiempo de secado	\$3.52	\$1.81
Costos con valores agregados	\$28.52	\$26.81
Riesgos Laborales	Es una de la más baja comparada a otras secadoras. La capacitación a trabajadores no es compleja.	El porcentaje de riesgos a incendios o explosiones es alta por lo que implica capacitaciones más rigurosas al trabajador.
Espacio	Pueden trabajar en cualquier parte sin importar el clima, no ocupa mucho espacio.	Necesitan espacio específico, muchos de ellos seleccionados por el cuerpo de bomberos u otras asociaciones, además de cuartos de bodega para almacenamiento.
Transporte	Esta cosntruido con planos simples y materiales livianos y resistentes en comparación a otros secadores, pueden desharmado y armarse en cualquier otro lugar.	Necesitan mayor espacio, contienen piezas más sofisticada que se necesitan transportar por separado o con mas restricciones.
Costo de adquisición	\$2500 nuevo	\$3500