

**Said Arturo
Rodríguez Romero**

Diseño aplicando dinámica computacional de fluidos de
un deshidratador directo de bandejas para jitomate.

2024



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

Diseño aplicando dinámica computacional de fluidos de
un deshidratador directo de bandejas para jitomate.

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestro en Ingeniería de Biosistemas

Presenta

Ing. Said Arturo Rodríguez Romero

Dirigido por:

Dr. Genaro Martín Soto Zarazúa

Querétaro, Qro. a diciembre 2024

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería en Biosistemas

**Diseño aplicando dinámica computacional de fluidos de un deshidratador
directo de bandejas para jitomate.**

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestro en Ingeniería en Biosistemas

Presenta:

Said Arturo Rodríguez Romero

Dirigido por:

Dr. Genaro Martín Soto Zarazúa

Dr. Genaro Martín Soto Zarazúa
Presidente

Dr. Gonzalo Macías Bobadilla
Secretario

Dr. Manuel Toledano Ayala
Vocal

Dra. Betsie Martínez Cano
Suplente

Dra. Priscila Sarai Flores Aguilar
Suplente

Centro Universitario,
Querétaro, Qro.
Diciembre 2024

DEDICATORIA

A mi mamá, papá y hermano por su infinito amor y apoyo durante todo este proceso, porque nunca me dejaron solo y me recordaron que siempre puedo intentarlo de nuevo, por sus enseñanzas y valores que me transmitieron para que yo pudiera completar esta meta que parecía imposible.

AGRADECIMEINTOS

A mi familia por estar siempre conmigo, en cada fallo y en cada logro.

A los doctores Genaro, Manuel, Gonzalo, Betsie y Priscila que me guiaron en el proceso de formación y por su confianza para realizar este proyecto.

A los compañeros y amigos que hice en el camino que me motivaron a seguir adelante.

A don Nico que me apoyó en el taller dándome consejos, ideas y capacitación del uso de las herramientas.

Al CONAHCYT y a la UAQ que me permitieron realizar este proceso de maestría con becas nacionales e institucionales.

CONTENIDO

DEDICATORIA	1
AGRADECIMIENTOS.....	2
ÍNDICE DE FIGURAS.....	5
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	7
ÍNDICE DE TABLAS.....	8
1. RESUMEN	9
2. ABSTRACT	10
3. ANTECEDENTES.....	11
3.1 Introducción.....	11
3.2 Proceso de Deshidratación.....	11
3.3 Dinámica Computacional de Fluidos.....	12
3.4 Control en la deshidratación.	13
3.5 Estado del arte de los deshidratadores.	13
3.5.1 Revisión científica.....	13
3.5.2 Revisión de patentes.....	15
3.5.3 Monitoreo tecnológico.....	16
3.5.4 Disponibilidad comercial.....	16
4. JUSTIFICACIÓN.....	18
5. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	19
6. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	21
6.1 Metodología de diseño.....	21
6.2 Proceso de deshidratación.....	22
6.2.1 Curvas de velocidad de secado para condiciones constantes.....	23
6.2.2 Transferencia de calor en secadores.....	24
6.3 Dinámica Computacional de Fluidos.....	24
6.3.1 Ecuaciones de Navier- Stokes.....	25
7. HIPÓTESIS.....	26
8. OBJETIVOS.....	27
9. METODOLOGÍA.....	28

9.1 Desarrollo de un modelo 3D de un deshidratador directo de bandejas utilizando software de CAD.	28
9.2. Simulación de la distribución del flujo de aire, la temperatura y la velocidad en el interior del modelo mediante herramientas de CFD.	32
9.3. Construcción de un prototipo del deshidratador y evaluación la distribución de la temperatura del aire en su interior.	36
9.3.1. <i>Sistema Mecánico.</i>	36
9.3.2. <i>Sistema de control.</i>	45
9.3.3. <i>Evaluación de la distribución del aire en el interior del deshidratador.</i>	47
9.3.4. <i>Evaluación de la calidad del proceso de deshidratación y del gasto energético del deshidratador.</i>	49
10. RESULTADOS Y DISCUSIONES	52
10.1 Simulación térmica	52
10.2 Evaluación del prototipo.	62
11. CONCLUSIONES	65
12. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Pasos de la metodología de Shigley (2011) resumida.	22
Figura 2. Optimización y mejora del diseño de un deshidratador directo de bandejas.	28
Figura 3. Vista isométrica en 3D del deshidratador Modelo 1.	29
Figura 4. Vista isométrica en 3D del deshidratador Modelo 2.	30
Figura 5. Pistola de aire caliente HG 2220 E, recuperada de Steinel Professional (2016).	30
Figura 6. Vista isométrica en 3D del deshidratador Modelo 3.	31
Figura 7. Vista isométrica en 3D del deshidratador Modelo 4.	32
Figura 8. Vista lateral de las condiciones de frontera y malla del Modelo 1.	33
Figura 9. Vista frontal de las condiciones de frontera y malla del Modelo 2.	34
Figura 10. Vista isométrica de las condiciones de frontera y malla del Modelo 3.	35
Figura 11. Vista isométrica de las condiciones de frontera y de malla del Modelo 4.	35
Figura 12. Tubo PTR para la construcción del deshidratador.	36
Figura 13. Cortes realizados a los tubos: a) transversal y b) 45°	36
Figura 14. a) Marco unido por soldadura, b) acabado de las uniones.	37
Figura 15. Vista frontal isométrica de la estructura mecánica del deshidratador.	38
Figura 16. Material utilizado: taladro, pijas de 3/4 de pulgada y silicón de alta temperatura.	38
Figura 17. Vista lateral del deshidratador con las láminas colocadas con pijas.	39
Figura 18. Vistas de las entradas y salidas de aire del deshidratador: a) interior y b) posterior.	40
Figura 19. Acondicionamiento de láminas para la construcción de las puertas: a) limpieza del óxido, b) limado de asperezas, c) colocación de pijas y d) marcos de las puertas.	41
Figura 20. Proceso de colocación de las puertas del deshidratador: a) instalación de los marcos con bisagras y b) aplicación de pintura.	42
Figura 21. Base para pistolas de calor: a) base en forma de "L", b) pistola con abrazadera.	42
Figura 22. Instalación de broches de presión en las puertas.	43
Figura 23. Vista frontal del equipo con manijas instaladas.	44
Figura 24. Vista posterior del equipo con tapas.	44
Figura 25. Controlador MT-512E-2HP, recuperado de Full Gauge (2016).	45
Figura 26. Relevador de estado sólido RZ3A, recuperado de Carlo Gavazzi (2014).	46
Figura 27. Conexiones eléctricas del sistema de control al relevador y a las pistolas de calor: a) caja abierta y b) caja cerrada.	46
Figura 28. Vista frontal del deshidratador con el sistema de control instalado.	47
Figura 29. Jitomates rebanados con un punto adecuado de madurez.	48
Figura 30. Charolas colocadas dentro del deshidratador para prueba de secado.	48
Figura 31. Registrador de datos GSP-6 de temperatura y humedad marca Elitech.	49

Figura 32. Herramienta Color Thresholder utilizada para identificar los píxeles correspondientes al fruto fresco. Se seleccionó un fondo translúcido para visualizar la ubicación de la charola.....	50
Figura 33. Herramienta Color Thresholder utilizada para identificar los píxeles correspondientes al fruto seco después de 16 horas en el deshidratador.....	51
Figura 34. Diferentes vistas de la temperatura del aire del deshidratador Modelo 1, incluyendo las temperaturas de las bandejas: (a) frontal, (b) lateral, (c) isométrica, y (d) isométrica.....	53
Figura 35. Diferentes vistas de la temperatura del aire del deshidratador Modelo 2, incluyendo las temperaturas de las bandejas: (a) frontal, (b) lateral, (c) isométrica, y (d) isométrica.....	54
Figura 36. Diferentes vistas de la temperatura del aire del deshidratador Modelo 3, incluyendo las temperaturas de las bandejas: (a) frontal, (b) lateral, (c) isométrica, y (d) isométrica.....	56
Figura 37. Diferentes vistas de la temperatura del aire del deshidratador Modelo 4, incluyendo las temperaturas de las bandejas: (a) frontal, (b) lateral, (c) isométrica, y (d) isométrica.....	57
Figura 38. Prototipo de deshidratador de bandejas para jitomate.....	61
Figura 39. La herramienta Color Thresholder ayuda a determinar la región $L^*a^*b^*$ de la imagen de frutos frescos segmentada y el mapa 3D de la misma escala, para una mejor visualización.....	62
Figura 40. La herramienta Color Thresholder ayuda a determinar la región $L^*a^*b^*$ de la imagen de frutos secos y el mapa 3D de la misma escala.	63

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación (1).	.....	23
Ecuación (2).	.....	23
Ecuación (3)	.....	24
Ecuación (4).	.....	24
Ecuación (5).	.....	25
Ecuación (6).	.....	25
Ecuación (7)	.....	25
<i>Ecuación (8)</i>	.....	26
Ecuación (9)	.....	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Gasto energético, área y eficiencia de diferentes deshidratadores adiabáticos de charolas	20
Tabla 2. Comparación de la temperatura de diferentes partes del Modelo 2 y 4.	58

1. RESUMEN

El proceso de deshidratación es una de las técnicas más antiguas empleadas para la conservación de alimentos. Este método consiste en extraer la mayor cantidad posible de agua de los productos, inhibiendo así el crecimiento de microorganismos responsables de su descomposición. La deshidratación no solo prolonga la vida útil de los productos agrícolas, sino que también incrementa su valor, permite su comercialización fuera de temporada y reduce los costos asociados al almacenamiento y transporte. Además, esta técnica contribuye a la disminución de hasta un tercio de los desperdicios alimentarios generados por la merma de productos en la etapa de postcosecha.

Durante el proceso de deshidratación, la temperatura, la velocidad del aire y la humedad relativa son factores críticos para asegurar una calidad óptima del producto, manteniendo su color y textura. En el presente proyecto, se diseñó y evaluó un deshidratador de bandejas para el secado de rodajas de jitomate, utilizando herramientas de Diseño Asistido por Computadora (CAD, por sus siglas en inglés) y realizando simulaciones con Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés) con el fin de garantizar una distribución uniforme del aire en el interior del equipo. Este enfoque permitió optimizar el uso de materiales y energía durante el proceso de deshidratación, manteniendo tanto el color como la textura deseados en los jitomates. La temperatura uniforme alcanzada durante el secado se evidenció mediante las pruebas de color en frutos frescos y deshidratados, las cuales mostraron una reducción en los tonos amarillos, indicativo de una alta calidad del proceso. El prototipo diseñado presentó una eficiencia de $2.16 \text{ m}^2 \text{ kW}^{-1} \text{ h}^{-1}$, comparable a los equipos comerciales y superior a los reportados en la literatura, destacando por su mayor capacidad de secado.

Palabras clave:

Deshidratador, secador directo, diseño mecánico, dinámica computacional de fluidos, prototipo, agricultura.

2. ABSTRACT

The dehydration process is one of the oldest techniques used for food preservation. This method involves extracting as much water as possible from the products, thus inhibiting the growth of microorganisms responsible for their decomposition. Dehydration not only extends the shelf life of agricultural products but also increases their value, allows for off-season commercialization, and reduces storage and transportation costs. Additionally, this technique helps decrease up to one-third of food waste generated during the post-harvest stage due to product spoilage.

During the dehydration process, temperature, air velocity, and relative humidity are critical factors to ensure optimal product quality while preserving its color and texture. In this project, a tray dehydrator was designed and evaluated for drying tomato slices using Computer-Aided Design (CAD) tools and simulations with Computational Fluid Dynamics (CFD) to ensure uniform air distribution inside the equipment. This approach optimized the use of materials and energy during the dehydration process while preserving the desired color and texture in the tomatoes. The uniform drying temperature achieved was confirmed through color tests on both fresh and dehydrated fruits, which showed a reduction in yellow tones, indicating high process quality. The designed prototype achieved an efficiency of $2.16 \text{ m}^2 \text{ kW}^{-1} \text{ h}^{-1}$, comparable to commercial equipment and superior to those reported in the literature, standing out due to its larger drying capacity.

Keywords:

Dehydrator, direct dryer, mechanical design, computational fluid dynamics, prototype, agriculture.

3. ANTECEDENTES.

3.1 Introducción.

La población mundial, en constante incremento, superará los 9.4 mil millones de habitantes en el año 2050 (UN, 2019), lo que requerirá de una mayor superficie para la producción de alimentos; sin embargo, se espera que en 2030 esta superficie ya sea insuficiente, por lo que requerirá incrementar la eficiencia de la producción agrícola (FAO, 2021). Esta situación conlleva también al aumento de deshechos generados en los procesos de producción de alimentos, los cuales no cumplen con las características deseadas por el mercado debido a un estado inadecuado para su consumo, lo que representa una gran pérdida de los recursos utilizados en su producción (Fabani et al., 2020). El proceso de deshidratación es una alternativa que permite reducir los residuos agrícolas, al aumentar su vida de anaquel (Madhankumar et al., 2021).

3.2 Proceso de Deshidratación.

La deshidratación de alimentos es un método que, permite preservar diversos productos agrícolas. Consiste en remover la humedad del producto al exponerlos a temperaturas constantes (entre 45 °C y 60 °C), con el fin de reducir la actividad microbiana y evitar afectar la calidad de los nutrientes que contienen (Sharma et al., 1995). Los métodos de secado pueden ser en lotes o continuos. El equipo en donde se lleva a cabo este proceso se llama deshidratador (Geankoplis, 2006).

Un deshidratador es una máquina diseñada que retira la humedad de los productos de manera uniforme hasta un punto deseado (Madhankumar et al., 2021). Estos equipos se clasifican en secadores directos o adiabáticos, en los que el sólido se expone directamente a aire caliente; secadores indirectos o no adiabáticos, en donde el calor se transfiere desde un medio que está en contacto con el producto; y secadores que utilizan energía dieléctrica, radiante o de microondas. Existen varios tipos de secadores, entre ellos los de bandejas o charolas, de tamices transportadores, de tornillo transportador, de lecho fluidizado, y de tambor. Los

secadores de bandejas son los más recomendados para pequeñas producciones, ya que son los más fáciles de construir e instrumentar; sin embargo, su tiempo de secado es elevado y requiere mayor mano de obra para su operación (McCabe et al., 2007).

Un secador directo de charolas generalmente incluye un calefactor, un ventilador para hacer circular el aire, rejillas de ventilación y una superficie de soporte para el material. El calefactor incrementa la temperatura y el ventilador circula el calor uniformemente en el interior del dispositivo, eliminando la humedad del producto. Se requiere mantener una temperatura constante durante un tiempo determinado, lo que justifica contar con un sistema automatizado que controle ambos factores con el fin de asegurar el secado uniforme del producto (Madhankumar et al., 2021).

3.3 Dinámica Computacional de Fluidos.

La aplicación de CFD en el proceso de deshidratación mejora la eficiencia y uniformidad del secado mediante la simulación precisa y la optimización del flujo de aire y la transferencia de calor dentro de los deshidratadores (Jamaledine & Ray, 2010; Nielsen, 2015). Adicionalmente esta herramienta informática es muy utilizada para predecir el rendimiento y las características del movimiento del aire. Proporciona una solución a los retos de ingeniería, mejora el control del proceso y reduce el gasto de recursos, incluyendo energía, tiempo y costes (Mott, 2004; Budynas & Nisbett, 2011; Castaño-Rodríguez et al., 2018; Salisu et al., 2019; Moyano Arévalo et al., 2021). Además, los ordenadores modernos tienen suficiente capacidad de procesamiento para permitir la aplicación de este método, lo que lo hace accesible y asequible (Malekjani & Jafari, 2018; Natarajan & Elavarasan, 2019). Aunque la información de la simulación puede describir el comportamiento del fluido, la información experimental es necesaria para evaluar la precisión y la fiabilidad en las simulaciones computacionales y también nos ayuda a confirmar el rendimiento de las mismas (Oberkampff & Trucano, 2002).

3.4 Control en la deshidratación.

El proceso de secado tradicional, utilizando solamente el sol, es lento y los productos puede contaminarse por animales, polvo o microorganismos; situación que justifica el uso de deshidratadores (Subash *et al*, 2019). La deshidratación en entornos controlados de temperatura, permite disminuir la cantidad de humedad de los productos, disminuyen el tiempo de secado y evitan afectar drásticamente la calidad del producto (Jibia & Umar, 2015). Es recomendable contar con un sistema de control automático para mantener condiciones más homogéneas durante el proceso (Madhankumar *et al*, 2021); esto se debe al alto contenido de humedad en frutas y verduras al ser cosechadas y son susceptibles a un rápido deterioro en su calidad si no son almacenadas a una temperatura adecuada (Chau & Chou, 2003) . Al implementar lógica difusa los fenómenos complejos, como es el caso de la deshidratación, se pueden resolver fácilmente, se reduce el consumo energético y también, permiten un desempeño más estable que el control convencional, al recuperarse en menor tiempo de las perturbaciones provocadas en el sistema (Abdenouri *et al*, 2022).

3.5 Estado del arte de los deshidratadores.

3.5.1 Revisión científica.

Los rangos de temperatura varían dependiendo del producto agrícola a secar, sin embargo, el factor limitante es el aire caliente y poco húmedo de secado. Se han encontrado temperaturas de trabajo de los secadores entre 40°C y 70°C en función del producto (Ortiz-Rodríguez *et al*, 2020; Çiftçioğlu *et al*, 2020; Fabani *et al*, 2020; Devi & Kalnar, 2021; Asnaz & Dolcek, 2021; Munkailu y Ogueke, 2022).

La deshidratación también se propone como una herramienta para aprovechar productos que no cumplen con las cualidades deseadas de consumo fresco (Djaeni *et al*, 2015; Fabani *et al*, 2020). Y con respecto a su eficiencia, se ha reportado mayores ventajas al usar sistemas híbridos o solares comparados con los que utilizan energías de origen fósil (Poonia *et al*, 2018; Ortiz-Rodríguez *et al*, 2020; Çiftçioğlu *et al*, 2020; Munkailu & Ogueke, 2022; Catorze *et al*, 2022).

Se utilizó combustible de cáscara de arroz como fuente de calor para un secador y se alcanzó un rendimiento térmico del 75% (Djaeni *et al*, 2015). El tiempo de secado se redujo con un diseño eficiente para aprovechar la radiación solar (Poonia *et al*, 2018). Se presentó un diseño de un secador solar de alimentos de convección forzada (Rao, 2018). Se determinó que un secador solar requiere de menor energía y generan menor emisión de CO₂, con respecto a un secador eléctrico (Fabani *et al*, 2020).

Al usar un secador híbrido solar-gas LP, se requirió de tiempos de secado de 14.3 y 11.7 h para eliminar de 179 y 183 kg de agua, respectivamente (Ortiz-Rodríguez *et al*, 2020). Se evaluó el secador solar Avatar (CHATRON) con arándanos y frambuesas, el cual en promedio usa 400 W de consumo eléctrico con una duración de operación durante 54.25 h redujo el consumo eléctrico en 2.3 kW·h, lo que representó un ahorro de 35%, el cual es afectado por las condiciones climáticas (Catorze *et al*, 2022).

Se automatizó un secador de té con sistemas de control inteligentes de temperatura, regulado con un microcontrolador AT89C2051 y un sistema de envío de datos a un servidor local con tecnología RS232 (Sarma *et al*, 2009). Se desarrolló un sistema de control inteligente con lógica difusa, para un secador solar de bandejas, incluyen un circuito integrado programable (PIC) y un módulo RS232 para el envío de datos digitales a una computadora. Los sistemas de lógica difusa son recomendados para problemas complejos, ya que son los más próximos en similitud del control de procesos con respecto al que aplicaría un humano (Abakarov *et al*, 2012).

Se han implementado sistemas modernos de control como el Proporcional Integral Derivativo (PID, Madhankumar *et al*, 2021a) junto con la implementación del microprocesador Arduino, siendo el proceso más popular, con resultados favorables a pequeña escala (Jain *et al*, 2019; Heriansyah *et al*, 2019; Madhankumar *et al*, 2021b; Miranda & Hernández, 2021; Devi & Kalna, 2021; Abdenouri *et al*, 2022).

Otros procesos utilizan sistemas de control inteligente en modelos de secado a

través de la lógica difusa para accionar actuadores y estabilizar sistemas de manera más rápida y eficiente (Sarma *et al*, 2009; Abakarov *et al*, 2012; Heriansyah *et al*, 2019) igualmente, para modelación del proceso de secado se ha implementado esta herramienta (Abdenouri *et al*, 2022). En forma similar, en el monitoreo remoto de sistemas de secado puede utilizarse con diferentes protocolos de comunicación, para lo cual se han desarrollado aplicaciones web (Miranda & Hernández, 2021) y se ha implementado el uso del internet de las cosas (IoT, Heriansyah *et al*, 2019).

3.5.2 Revisión de patentes.

Se diseñó un sistema para deshidratar alimentos en un circuito cerrado, mediante sensores comerciales para el monitoreo de peso, humedad, presión, temperatura y velocidad del aire; junto con un control PID tipo ON-OFF, el cuál abre las compuertas en caso de detectar alta humedad en el sistema (Monroy-Lomelí, 2007). Se desarrolló un método de automatización de un secador híbrido para plantas; el sistema mide la temperatura y la humedad relativa con sensores de alta precisión para el control de compuertas de aire, deshumidificador y ventilador de aire; el control se realiza a través de un microchip con conexión Ethernet (Gonçalo-Nuno, 2015). Se patentó un deshidratador con sistema de control inteligente de la temperatura; éste, utiliza un control ON-OFF con ayuda de timers (Palese & Baker, 2016). Se diseñó un secador eléctrico para frutas; entre otros componentes tiene un microcontrolador PIC16F877, un sensor de temperatura LM35 y uno de peso. Con este sistema se logró la disminución significativa en el tiempo de secado, comparado con un secador solar y uno indirecto (Jibia & Umar, 2015).

Se presentó el diseño de deshidratador tipo túnel para alimentos con básculas y variador de frecuencia en el ventilador, sensores de temperatura y humedad, con Controlador Lógico Programable (PLC, por sus siglas en inglés) para operaciones de monitoreo y control de acceso remoto (Unda-García, 2018). Se registró un deshidratador de bandejas para sustancias aromáticas, que realiza el calentamiento al poner en contacto el aire con los tubos del condensador frigorífico

y, además, controla la temperatura de este fluido (Posada-González, 2021).

3.5.3 Monitoreo tecnológico.

Con base en lo expuesto, se puede mencionar que en el desarrollo de los diseños de deshidratadores de alimentos ha tratado de mantener condiciones uniformes dentro sus procesos, inicialmente mediante la modificación de sus de acuerdo con el tipo de secador empleado, ya sea de charolas (Sharma et al., 1995), de bandas transportadora, de tambores, entre otros (McCabe et al., 2007). Posteriormente, con el fin de mejorar el desempeño del proceso se incorporaron sistemas de monitoreo y control ON-OFF (Monroy-Lomelí, 2007; Palese & Baker, 2016). Actualmente las mejoras de los deshidratadores incluyen sistemas híbridos o solares que persiguen sustituir el uso de energías fósiles (Catorze et al., 2022; Çiftçioğlu et al., 2020; Ortiz-Rodríguez et al., 2020; Poonia et al., 2018), aunque los de tipo industrial aún son eléctricos en su mayoría. Sin embargo, en lo referente a las mejoras del control se ha utilizado principalmente técnicas clásicas para Heoptimizar los equipos junto con PICs (Jibia, 2015), PLCs (Unda-García, 2018) y más recientemente con microcontroladores Arduino (Abdenouri et al., 2022; Devi & Kalnar, 2021). Recientemente, se ha popularizado la implementación de sistemas de control inteligente ya que permiten aumentar significativamente su eficiencia en la deshidratación de alimentos (Sarma *et al*, 2009; Abakarov *et al*, 2012; Heriansyah *et al*, 2019; Abdenouri *et al*, 2022) y, además, el uso de tecnología IoT permite el monitoreo remoto, lo que representa ventajas muy atractivas para su implementación (Heriansyah *et al*, 2019).

3.5.4 Disponibilidad comercial.

Debido a que el presente proyecto pretende desarrollar un diseño de deshidratador, para garantizar las condiciones adecuadas del proceso y reducir el gasto energético del mismo, es necesario verificar la presencia en el mercado de equipos comerciales, así como las ventajas que ofrecen, con el fin de determinar las

necesidades actuales del diseño aprovechando la tecnología disponible de acuerdo con los costos de fabricación.

- La empresa Commercial Dehydrators de Reino Unido cuenta con una línea completa de deshidratadores de alimentos de tipo carolas; los equipos cuentan con un sistema de convección de aire forzado, incluye timers para controlar la duración del proceso, se puede operar entre 30°C y 90°C, el más pequeño tiene 16 bandejas con área de secado de 2.56 m² y consumo eléctrico es de 1.5 kW·h⁻¹. Tiene un costo cercano a \$1564 USD.
- Baixin Machinery cuenta con secadores de tipo bandas perforadas, con tiempo de secado entre 0.5 a 5 h (dependiendo el producto), trabaja entre 40°C y 120°C, puede utilizar varias fuentes energéticas para su funcionamiento. Con cuatro capas se tiene un área de secado de 36 m², una capacidad evaporativa de 300- 500 kg·h y un consumo eléctrico de 14.9 kW·h.
- Foodehy es una empresa de tecnologías de deshidratación, tiene a la venta el deshidratador industrial F-50, el cual es de operación continua o de tipo Batch según lo requerido por el cliente. Es de tipos charolas de acero inoxidable y trabaja con una superficie total de hasta 50 m². Su consumo eléctrico es de 9 kW·h y su gasto energético de 60 kW·h de un boiler de gas. Cuenta con pantalla touch para el monitoreo de datos, diversos programas de secado con rangos de temperatura y velocidad de aire diferentes; posee monitoreo en tiempo real del peso del producto y acceso remoto a ellos desde varios tipos de dispositivos electrónicos.
- La marca Advanced Food Dehydrators tiene disponible el modelo AirFlow 130, con superficie de secado mediante charolas cercana a 24 m². Está diseñado principalmente para el secado de carne, pero también puede usarse en frutas y vegetales. Tiene un calentador de 15 kW·h, que puede elevar la temperatura hasta 70°C y un ventilador que asegura un flujo de aire de 70.7 m³·min⁻¹. Cuenta con un control digital de temperatura que permite su funcionamiento entre 37.7°C y 90.5°C, además posee un data logger para descargar los datos de temperatura y humedad.
- BBKW Drying Solutions es una empresa que presume fabricar secadores de acuerdo con las necesidades del cliente. Fabrican secadores desde 10 hasta 1 000

m², con deshumidificador de 20 a 1 000 L·día⁻¹, diferentes sistemas de ventilación (forzada, directa en el producto, con o sin presurización, caliente o fría), un sistema de calentamiento y enfriamiento de acuerdo a las condiciones geográficas y ambientales y un sistema de control en función del peso del producto.

- La empresa Saecsa tiene a la venta un secador solar industrial con capacidad de secado de 500 kg·día⁻¹.

En este trabajo se busca desarrollar un deshidratador directo de bandejas con un volumen superior a los reportados previamente, utilizando herramientas de CFD para optimizar tanto los recursos empleados en su construcción como el proceso de deshidratación, sin comprometer la calidad de los jitomates.

4. JUSTIFICACIÓN.

En México, más de 20 millones de toneladas de productos alimenticios son desperdiciados cada año, de los cuales aproximadamente un tercio corresponde a alimentos en buen estado que no son consumidos (UN, 2019) . Este desperdicio podría reducirse en un tercio mediante el proceso de deshidratación (Asnaz & Dolcek, 2021). La deshidratación no solo prolonga la vida útil de los productos agrícolas, sino que también aumenta su valor agregado, permite su disponibilidad fuera de temporada y reduce en un tercio el espacio necesario para su almacenamiento y transporte (Ertekin & Yaldiz, 2004). Los deshidratadores directos presentan una solución efectiva a esta problemática, ya que pueden procesar volúmenes de hasta 200 kg·h⁻¹ y son los más económicos de construir (McCabe et al., 2007). Entre ellos, los deshidratadores de tipo charolas destacan por su sencillez de implementación (Geankoplis, 2006). Sin embargo, estos equipos presentan una desventaja significativa: los ciclos de secado pueden extenderse hasta 50 horas por carga, dependiendo el producto agrícola procesado (Catorze et al., 2022). Además, el proceso de deshidratación representa aproximadamente el 25% del consumo energético total en la agroindustria (Mohana et al., 2020).

El control de la temperatura, la velocidad del aire y la humedad relativa en el proceso de deshidratación, garantizan una buena calidad en producto, sin dañar su color y su textura (Jibia & Umar, 2015).

Por todo lo mencionado anteriormente, es necesario diseñar un deshidratador directo de charolas con dimensiones superiores a las previamente reportadas, y que, además, sea de fácil implementación para usarlo en comunidades marginadas. El diseño debe asegurar una distribución homogénea de la temperatura mediante una geometría optimizada, lo que permitirá mejorar la eficiencia del proceso de secado.

5. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.

Actualmente los deshidratadores eléctricos disponibles en el mercado tienen un gasto energético promedio, en función del área, de $0.56 \text{ kW}\cdot\text{h m}^{-2}$; en contraste, los sistemas híbridos existentes pueden secar una mayor área con menor gasto eléctrico como se muestra en la Tabla 1. La ventaja de los equipos eléctricos es que pueden realizar el proceso más rápido que los solares y no dependen de las condiciones ambientales para su funcionamiento.

Adicionalmente, no se han reportados equipos con cámara de secado superiores a 1m^3 , debido a la complejidad que implica controlar variables críticas como la temperatura, la humedad y la velocidad del aire. Si bien se han implementado diferentes técnicas de control de estas variables, los métodos de CFD permiten simular el comportamiento del equipo y analizar múltiples variables de manera simultánea. Esto facilita la optimización tanto de la geometría del equipo como del proceso de deshidratación.

Tabla 1. Gasto energético, área y eficiencia de diferentes deshidratadores adiabáticos de charolas.

<i>Autor/Empresa</i>	<i>Fuente de Energía</i>	<i>de</i>	<i>Gasto energético</i> <i>kW·h</i>	<i>Área de secado</i> <i>m²</i>	<i>Eficiencia</i> <i>m² kW⁻¹ h⁻¹</i>
<i>Ortiz-Rodríguez et al (2020)</i>	Fotovoltaico-		42.3	92.40	2.18
	gas LP				
<i>Abdenouri et al, 2022</i>	Solar-eléctrico		4.0	3.80	0.95
<i>Commercial Dehydrators</i>	Eléctrico		1.5	2.54	1.69
<i>Baixin Machinery</i>	Eléctrico		14.9	36.00	2.42
<i>Foodehy</i>	Gas LP y		69	50.00	0.72
	Eléctrico				
<i>Advanced food dehydrators</i>	Eléctrico		15	24.00	1.6

La incógnita es que si, al modificar y simular la geometría de un deshidratador de mayor tamaño mediante herramientas de CFD, se puede lograr una optimización en la distribución de la temperatura y el flujo de aire dentro del equipo, con el fin de reducir el consumo energético sin afectar drásticamente el color y la textura de los jitomates.

6. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.

6.1 Metodología de diseño.

El diseño de ingeniería es el proceso de aplicar las diversas técnicas y principios científicos con el propósito de definir un dispositivo, un proceso o un sistema con suficientes detalles que permitan su realización (Mott, 2004). El objetivo del diseño mecánico es producir un producto útil que satisfaga las necesidades de un cliente, que sea seguro, eficiente, fiable, económico y práctico de fabricar (Mott, 2004). El proceso de diseño comienza con la identificación de una necesidad, es un proceso iterativo que por lo general termina con la presentación de los planos o el prototipo que satisface la necesidad (Budynas & Nisbett, 2011).

La identificación de la necesidad es el inicio del proceso de diseño, siendo una actividad altamente creativa, debido a que la necesidad en muchos casos no es evidente y puede ser provocado por circunstancias adversa o aleatorias. La definición del problema es más detallada y debe incluir todas las especificaciones del objeto que se va a diseñar, junto con las limitaciones de estas magnitudes. Estas especificaciones muchas veces son definidas por la experiencia del diseñador y determinarán el coste, el número de unidades que hay que fabricar, la vida útil prevista, el alcance, las dimensiones, la temperatura de funcionamiento, entre otras características de diseño. La síntesis o diseño conceptual, es la etapa en la que hay que realizar análisis para evaluar si el rendimiento del sistema es satisfactorio o mejor; los que no superan el análisis se revisan, se mejoran o se descartan, mientras los que tienen potencial se optimizan para, posteriormente elegir el producto más competitivo. Así, podemos sintetizar varios componentes de un sistema, analizarlos y optimizarlos, y volver a la síntesis para ver qué efecto tiene en las partes restantes del sistema. La evaluación es la prueba final de un diseño, suele implicar la prueba de un prototipo y se pretende descubrir si es funcional y económicamente viable. La comunicación del diseño es el último paso del proceso de diseño, es un trabajo de venta, donde se intenta demostrar que la su solución

diseñada es la mejor (Budynas & Nisbett, 2011). En la figura 1 se muestra la metodología de diseño en un diagrama de manera resumida.

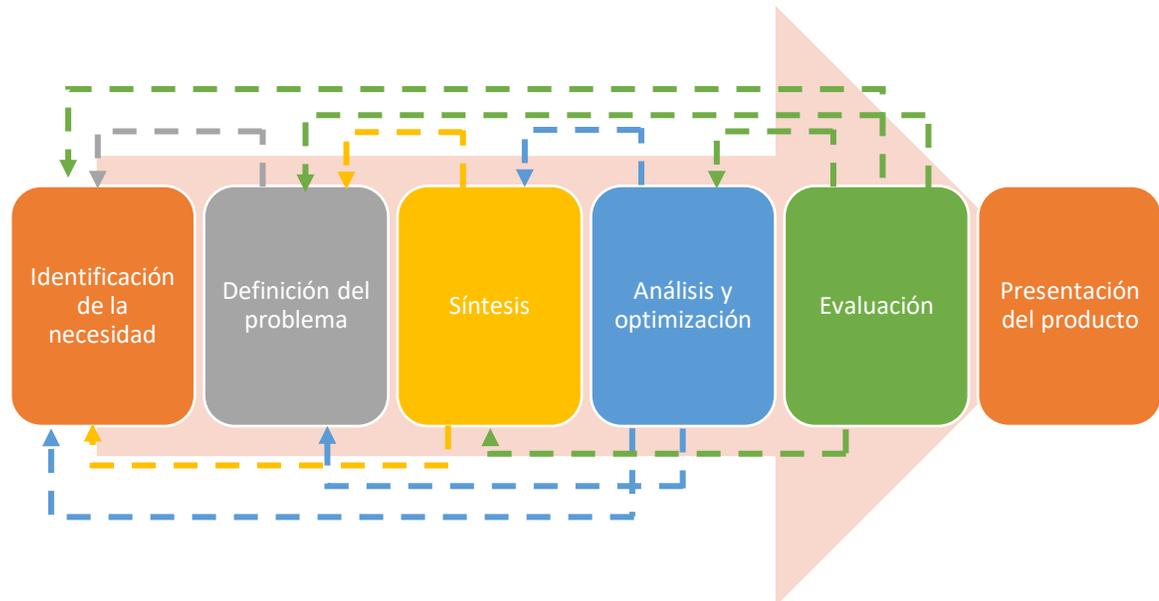


Figura 1. Pasos de la metodología de Shigley (2011) resumida.

Es importante mencionar que la mejor opción de diseño puede estar en función de varios aspectos, algunos ejemplos son: la tecnología disponible para la fabricación del producto, materias primas, mano de obra, instalaciones, capacidad de producción, calidad, distribución y envío, la demanda del mercado, costo de producción, seguridad en su uso, medioambiente, funcionamiento y eliminación del producto (Mott, 2004).

6.2 Proceso de deshidratación.

El proceso de secado de sólidos consiste en separar pequeñas cantidades de agua, u otro líquido, de un sólido para disminuir el contenido de líquido residual hasta un valor aceptable. El secado es por lo común la etapa final de una serie de operaciones y, con frecuencia, el producto que se extrae de un secador está listo para el empaque (McCabe et al., 2007).

La deshidratación se refiere al proceso de eliminación de agua de los materiales. Por lo general este proceso elimina el agua en forma de vapor con aire, recurriendo a fenómenos de transferencia de masa y energía. En algunos casos, el agua se puede eliminar de los materiales sólidos por medios mecánicos, utilizando prensas, centrífugas y otros métodos, que son más económicos que el secado térmico. El secado o deshidratación de materiales biológicos (en especial los alimentos), se usa también como técnica de preservación., ya que los microorganismos que provocan la descomposición de los alimentos no pueden crecer y multiplicarse en ausencia de agua, además los alimentos secos pueden almacenarse durante periodos bastante largos (Geankoplis, 2006).

La temperatura en el secador varía con respecto al comportamiento del líquido del material de alimentación, de la temperatura del medio de calentamiento, del tiempo de secado y de la temperatura final que toleran los sólidos secos. Sin embargo, el modelo de variación es similar para todos los secadores (McCabe et al., 2007).

6.2.1 Curvas de velocidad de secado para condiciones constantes.

Los datos que se obtienen de un experimento de secado por lotes, se expresan como peso total W del sólido húmedo a diferentes tiempos de t horas en el periodo de secado. Para convertirlos a velocidad de secado se usan las siguientes fórmulas. Primero, si W es el peso del sólido húmedo en kilogramos totales de agua más sólido seco y W_s es el peso del sólido seco en kilogramos está dado por la ecuación 1 (Geankoplis, 2006):

$$X_t = \frac{W - W_s}{W_s} \frac{\text{kg total de agua}}{\text{kg de sólido seco}} \quad \text{Ecuación (1).}$$

Y posteriormente se determina el contenido de humedad de equilibrio X^* kg de humedad kg de sólido seco⁻¹. Con él se procede a calcular el valor del contenido de humedad libre X en kg de agua libre kg de sólido seco⁻¹ para cada valor de X_t y se forma la curva de humedad libre en función del tiempo, ecuación 2 (Geankoplis, 2006):

$$X = X_t - X^* \quad \text{Ecuación (2).}$$

6.2.2 Transferencia de calor en secadores.

El secado de sólidos húmedos es por definición un proceso termodinámico. En el proceso de secado adiabático, se encuentra presente aire, la temperatura superficial depende de las velocidades de transferencia de masa y de transferencia de calor para los cálculos de secado (McCabe et al., 2007).

El consumo eléctrico se puede calcular usando la ecuación 3:

$$E_{elec} = I \cdot V \cdot t_{op} \quad \text{Ecuación (3)}$$

donde I es la corriente eléctrica, V el voltaje de alimentación y t_{op} es el tiempo de operación del equipo empleado para calentar.

La eficiencia del sistema puede definirse en la ecuación 5 (Ortiz-Rodríguez et al., 2020) modificada en función del área de secado y la energía eléctrica consumida:

$$\eta_E = \frac{A_{secado}}{E_{elec}} \quad \text{Ecuación (4)}.$$

6.3 Dinámica Computacional de Fluidos

En las últimas décadas, se han llevado a cabo numerosas investigaciones con el fin de comprender las alteraciones químicas y físicas del proceso de secado y desarrollar técnicas innovadoras para evitar un deterioro desfavorable de la calidad. La aplicación de CFD en el proceso de deshidratación mejora la eficiencia y uniformidad del secado mediante la simulación precisa y la optimización del flujo de aire y la transferencia de calor dentro de los deshidratadores (Jamaleddine & Ray, 2010; Nielsen, 2015). Además, la CFD es una valiosa herramienta informática utilizada para predecir el rendimiento y las características del movimiento del aire. (Budynas & Nisbett, 2011; Mott, 2004). Adicionalmente, los ordenadores modernos tienen suficiente capacidad de procesamiento para permitir la aplicación de este método, lo que lo hace accesible y asequible (Malekjani & Jafari, 2018; Natarajan & Elavarasan, 2019).

6.3.1 Ecuaciones de Navier- Stokes.

Los métodos de CFD resuelven las ecuaciones de flujo de Navier--Stokes, que describen las leyes de conservación de la masa, el momento y la energía (ecuaciones (6)-(8)):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = S_M^p \quad \text{Ecuación (5).}$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i + S_{Ii}^p, i = 1,2,3; j = 1,2,3 \quad \text{Ecuación (6).}$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i H}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (u_j (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) + \frac{\partial p}{\partial t} - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon + S_i u_i + S_H^p + Q_H$$

$$H = h + \frac{u^2}{2} + \frac{5}{3} k - \frac{\Omega^2 r^2}{2} - \sum_m h_m^0 y_m \quad \text{Ecuación (7)}$$

donde u es la velocidad del fluido, ρ es la densidad del fluido, S_i es la fuerza externa distribuida por unidad de masa debida a la resistencia de un medio poroso (S_i^{porous}), la gravedad ($S_i^{gravity} = \rho g_i$, donde g_i es la componente de aceleración gravitacional a lo largo de la i -ésima dirección de coordenadas), y la rotación del sistema de coordenadas ($S_i^{rotation}$); es decir, $S_i = S_i^{porous} + S_i^{gravity} + S_i^{rotation}$, h es la entalpía térmica; S_M^p , S_{Ii}^p , S_H^p son términos adicionales de intercambio interfacial debidos a la interacción de partículas Euler-Lagrange; Q_H es una fuente de calor por unidad de volumen, τ_{ij} es el tensor viscoso de esfuerzo cortante, q_i es el flujo de calor difusivo, Ω es la velocidad angular del sistema de coordenadas en rotación, r es la distancia de un punto al marco de referencia de rotación, k es la energía cinética de la turbulencia, h_m^0 es una entalpía térmica individual del m -ésimo componente de la mezcla, y_m es la concentración del m -ésimo componente de la mezcla. Los subíndices se utilizan para indicar la suma en las tres direcciones de coordenadas (Dassault Systemes, 2020). La herramienta de simulación de flujo

permite a los investigadores predecir la transferencia de calor simultánea en sólidos y fluidos con intercambio de energía, como se describe en la ecuación (9):

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda_i \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + Q_H \quad \text{Ecuación (8)}$$

donde e es la energía interna específica, $e = C \cdot T$, C es calor específico, Q_H es el calor específico liberado por unidad de volumen, and λ_i son los valores propios del tensor de conductividad térmica (Dassault Systemes, 2020).

7. HIPÓTESIS.

El diseño de un deshidratador directo de bandejas con un volumen de 2 m³ permitirá una distribución más eficiente del flujo de aire en sistemas de gran capacidad, reduciendo el consumo energético en comparación con deshidratadores de menor tamaño reportados. Además, este diseño podrá mantener una temperatura uniforme durante el proceso de secado gracias a la implementación de métodos CFD.

8. OBJETIVOS.

General.

Diseñar un deshidratador directo de bandejas para el procesamiento de jitomate, utilizando métodos de CFD, con el fin de garantizar una distribución uniforme de la temperatura del aire en el interior del equipo, optimizando el proceso de secado.

Específicos.

- a) Desarrollar un modelo 3D de un deshidratador directo de bandejas utilizando software de CAD, con el fin de optimizar su estructura y funcionalidad para el proceso de secado de jitomates.

- b) Simular la distribución del flujo de aire, la temperatura y la velocidad en el interior del modelo mediante herramientas de CFD, para evaluar y mejorar la eficiencia del sistema del deshidratador.

- c) Construir un prototipo del deshidratador y evaluar la distribución de la temperatura del aire en su interior y el gasto energético, con el objetivo de verificar su desempeño.

9. METODOLOGÍA.

La investigación se llevó a cabo en la Universidad Autónoma de Querétaro, campus Amazcala, perteneciente al municipio de El Marqués al suroeste del estado de Querétaro. Se localiza entre los 20° 31' y 20° 58' de latitud norte y su longitud se encuentra entre los 100° 09' y los 100° 24' oeste.

9.1 Desarrollo de un modelo 3D de un deshidratador directo de bandejas utilizando software de CAD.

Se siguió la metodología de Shigley propuesta en 2011 (Budynas & Nisbett, 2011) para diseñar un deshidratador directo de bandejas. Se utilizó el software SolidWorks Premium 2020 SP1.0 para generar el diseño detallado tridimensional de varias propuestas con el fin de seleccionar la mejor geometría para que posteriormente simule con el mismo software.

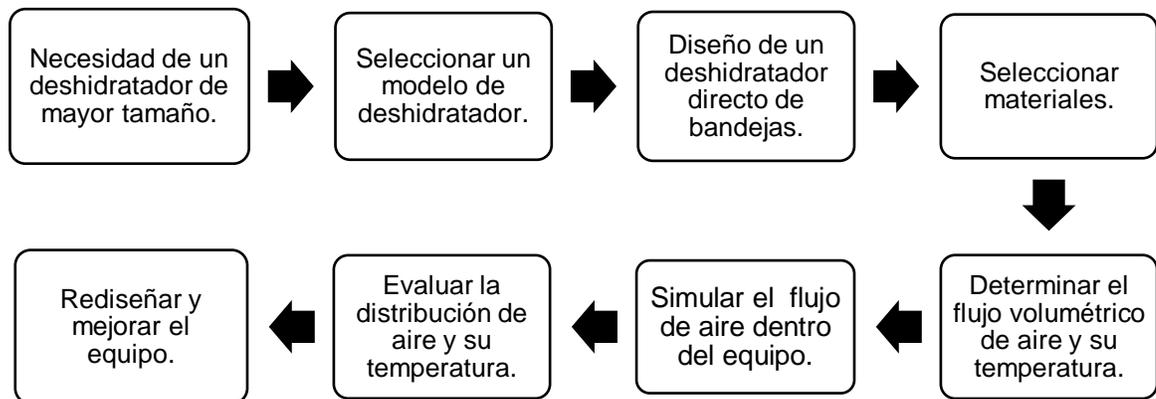


Figura 2. Optimización y mejora del diseño de un deshidratador directo de bandejas.

A continuación, se muestra la geometría del primer deshidratador diseñado, Modelo 1, con todas las medidas indicadas en milímetros. Dado que el equipo estará en contacto con productos alimenticios, se seleccionó el acero inoxidable AISI 304 como material para garantizar la seguridad y la calidad del producto. Este material específico tiene una conductividad térmica de $16 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ y una densidad de 8 g

m⁻³. El software ha calculado la masa del equipo en 926 kg y el volumen del modelo en 2.11 m³. Para esta versión del equipo, se consideró utilizar un ventilador con un flujo de aire de 0.08 m³ s⁻¹ en la parte lateral. Igualmente se consideró una resistencia de 3.5 kW como fuente de calor para calentar el aire que ingresa en el equipo (Figura 3). Se descartó por los resultados obtenidos en las simulaciones de CFD, ya que no fue posible alcanzar una temperatura uniforme en el equipo debido a su geometría.

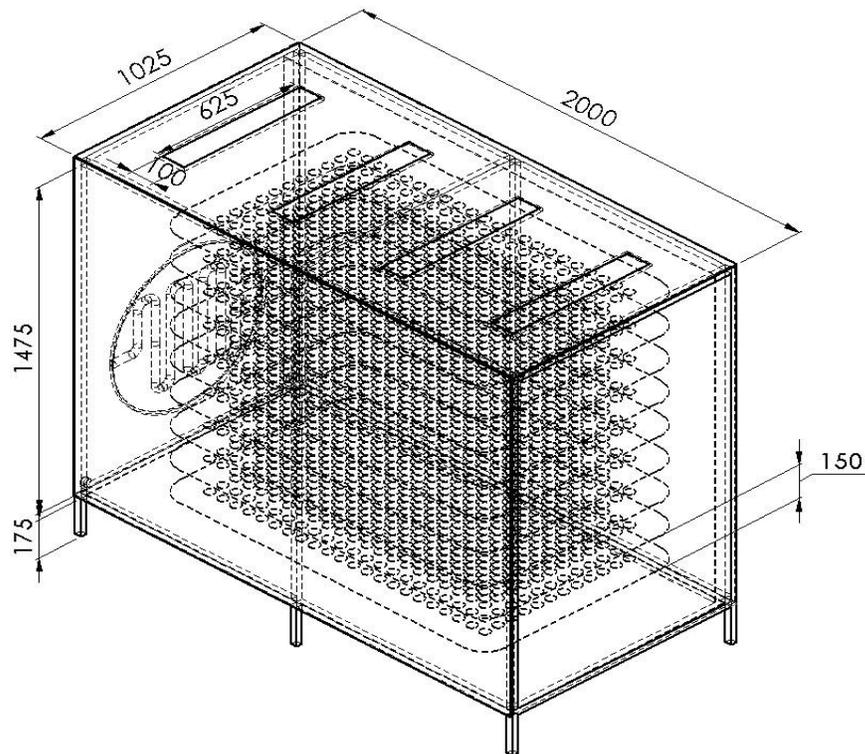


Figura 3. Vista isométrica en 3D del deshidratador Modelo 1.

La segunda versión del equipo se diseñó a partir de la identificación de las deficiencias en la distribución del aire del modelo 1. Una vez más, se eligió como material el acero inoxidable AISI 304, que presenta las propiedades antes mencionadas. La configuración geométrica del segundo deshidratador se muestra a continuación con todas sus medidas expresadas en milímetros. En este caso, el volumen calculado por el programa fue de 2.02 m³, con una masa de 395,5 kg. Este modelo considera dos ventiladores con un flujo de 0.02 m³ s⁻¹ cada uno y dos resistencias de 2.5 kW como fuente de calor. Se descartó este diseño, debido a la

poca practicidad de colocar ventiladores de esas dimensiones (Figura 4).

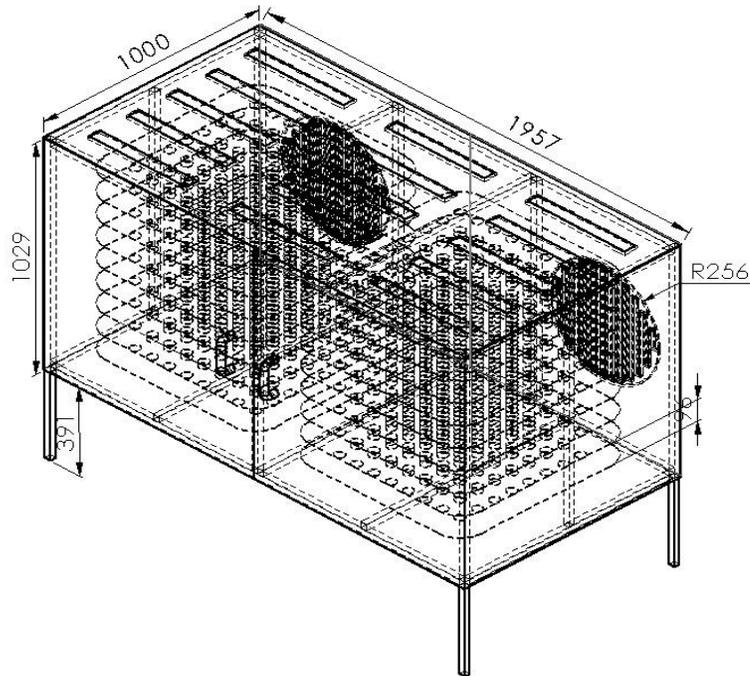


Figura 4. Vista isométrica en 3D del deshidratador Modelo 2.

Para la tercera versión del equipo se consiguieron dos pistolas de aire HG 2220 E marca STEINEL PROFESSIONAL (Figura 5). Estos equipos sustituyen a los ventiladores y a la vez a las resistencias propuestas en diseños anteriores. Sus características fueron obtenidas del su reporte técnico (Steinel Professional, 2016).



Figura 5. Pistola de aire caliente HG 2220 E, recuperada de Steinel Professional (2016).

Para lograr lo anterior, se ajustaron las dimensiones de los ventiladores de entrada en el modelo 3D, obteniendo así la tercera configuración geométrica del

deshidratador. Todas las medidas se expresaron en milímetros. El volumen, el peso y el flujo de aire son iguales al Modelo 2. El gasto eléctrico del equipo HG 2220 E es de 1.5 kW. Se considera la salida del aire en la parte inferior del equipo para asegurar de manera natural un flujo de aire por toda la cámara de secado. Este diseño presentó vórtices y altas temperaturas, por lo que de nuevo se reconsideró la ubicación de las pistolas de calor (Figura 6).

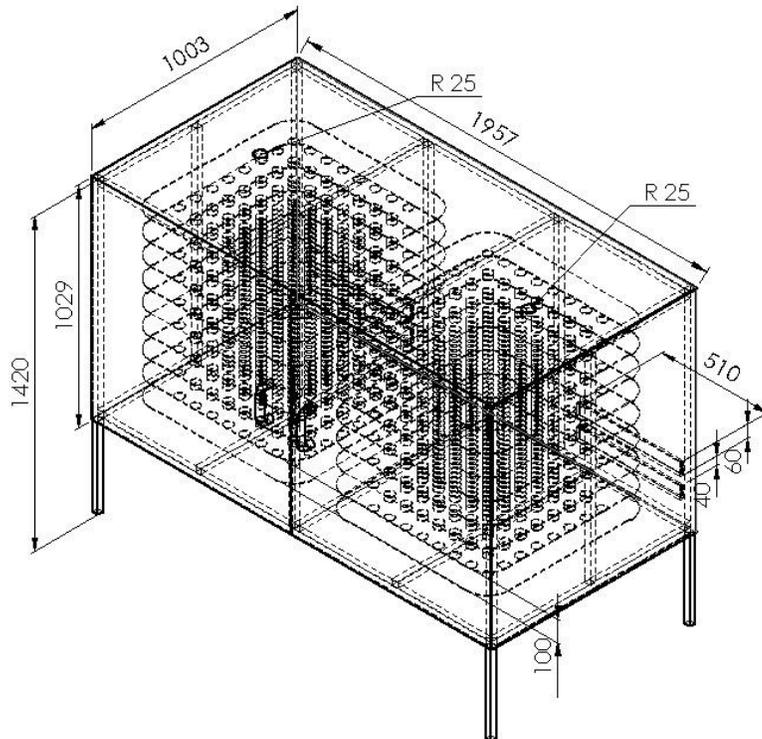


Figura 6. Vista isométrica en 3D del deshidratador Modelo 3.

La versión final del equipo mantiene las mismas condiciones y componentes que el Modelo 3 descrito anteriormente. La diferencia radica en la ubicación de las pistolas de calor, que se colocaron en la parte superior de la cara posterior. Esta disposición fue seleccionada para inducir un flujo de aire uniforme desde la parte superior hacia la inferior del equipo, en forma de 'U', con el objetivo de reducir la turbulencia que pudiera presentarse. Todas las medidas se especificaron en milímetros (Figura 7).

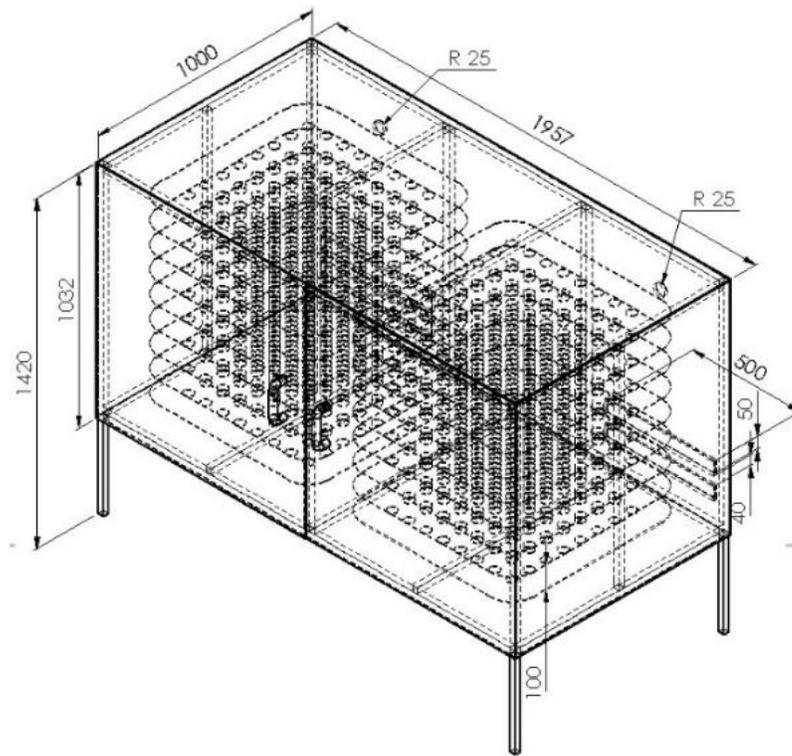


Figura 7. Vista isométrica en 3D del deshidratador Modelo 4.

9.2. Simulación de la distribución del flujo de aire, la temperatura y la velocidad en el interior del modelo mediante herramientas de CFD.

Se utilizó la herramienta de Flow Simulation, del mismo Solidworks, para simular la entrada de aire y facilitar el análisis del interior del equipo. Las condiciones de frontera comprenden una fuente de calor de 3.5 kW, un caudal volumétrico de $0.08 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a $30 \text{ }^\circ\text{C}$ y una presión ambiental de 101.3 MPa. Se establecieron tres objetivos con principales con parámetros específicos para garantizar que el programa alcanzara un punto de convergencia y que el tiempo de cálculo necesario para la simulación se mantuviera dentro de límites aceptables: la temperatura media del fluido, la temperatura media total del equipo y la temperatura media del sólido. Además, el software se configuró para utilizar iteraciones automáticas, que identificaron la solución óptima a través de 168 iteraciones. Este proceso excluía los casos en los que la temperatura alcanzaba el punto de fusión del material y los casos en los que se formaba un vórtice en el interior del equipo debido a

desequilibrios de presión entre el aire de entrada y el entorno circundante. Se construyó automáticamente una malla global; se seleccionó el nivel 3 para el análisis debido al tamaño del equipo y para reducir el tiempo de cálculo necesario para cada simulación (Figura 8).

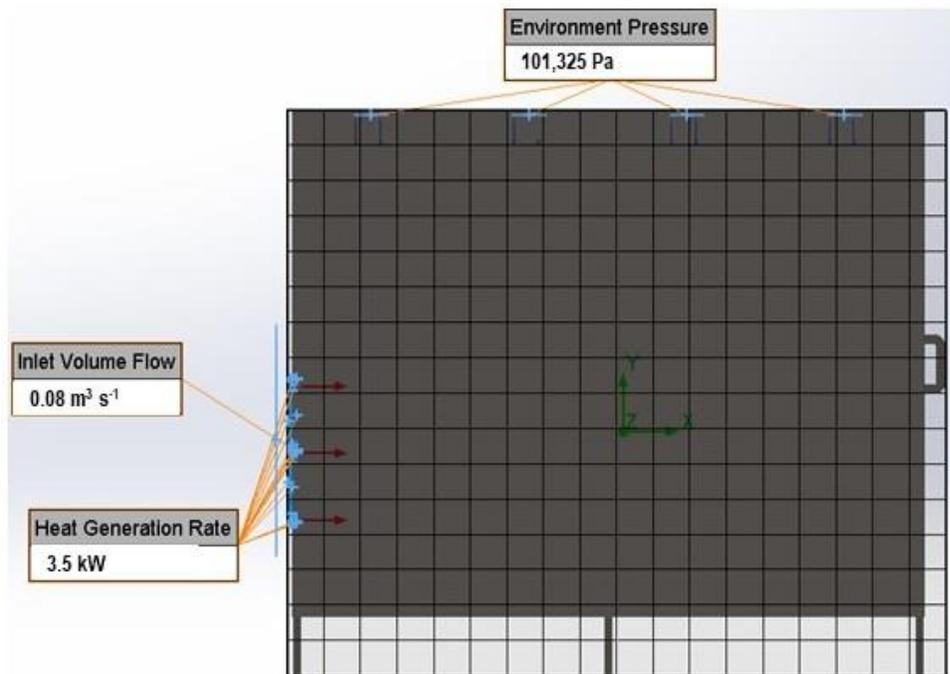


Figura 8. Vista lateral de las condiciones de frontera y malla del Modelo 1.

Además, se incorporaron al modelo gráficos de velocidad, dirección y temperatura del aire, junto con un gráfico de la temperatura de la superficie de la bandeja. Estos gráficos se incluyeron para ilustrar el comportamiento de la transferencia de calor en las charolas de secado.

Del mismo modo se utilizó Flow Simulation para analizar el Modelo 2 de deshidratador. Las condiciones de frontera comprenden dos fuentes de calor de 2.5 kW, un caudal volumétrico de $0.02 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a $30 \text{ }^\circ\text{C}$ y una presión ambiental de 101.3 MPa. Para lograr la convergencia deseada del software, deben cumplirse los objetivos anteriormente expuestos: la temperatura media del fluido, la temperatura media total del equipo y la temperatura media del sólido. Además, se utilizó una configuración con iteraciones automáticas, en la que se emplearon 224 de dichas

iteraciones para resolver el modelo, con la excepción de aquellos casos en los que el material se fundió y aquellos casos en los que se formó un vórtice dentro del deshidratador. Se seleccionó el nivel 3 de mallado global y se incluyeron en el modelo las mismas parcelas mencionadas anteriormente para comparar el comportamiento del aire de los dos equipos (Figura 9).

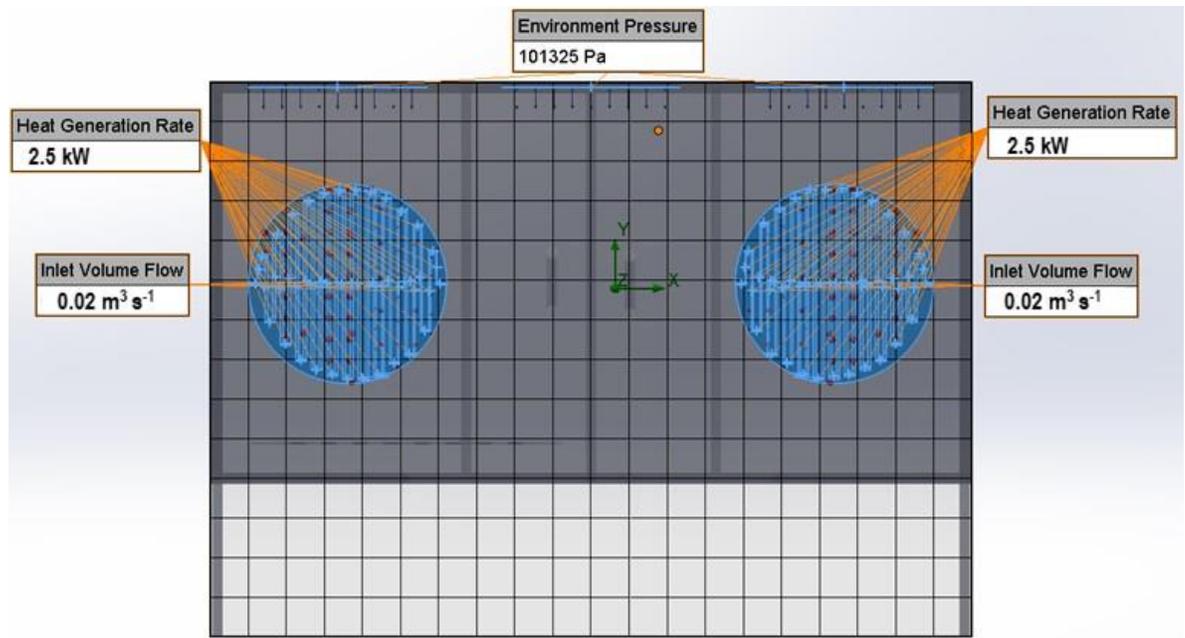


Figura 9. Vista frontal de las condiciones de frontera y malla del Modelo 2.

Para el Modelo 3 las condiciones de frontera comprenden un caudal volumétrico de 0.02 m³s⁻¹ a 80 °C proporcionado por la pistola de aire caliente Steinel HG 2220 E y una presión ambiental de 101.3 MPa. Se consideraron los mismos objetivos anteriores y se realizó con 150 iteraciones. El mallado se realizó igualmente de manera automático en nivel 3 (Figura 10).

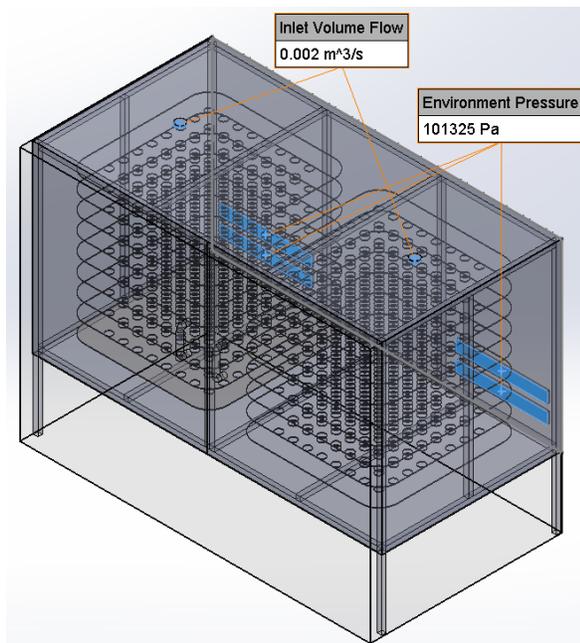


Figura 10. Vista isométrica de las condiciones de frontera y malla del Modelo 3.

Para el Modelo 4 todas las condiciones de frontera son iguales al Modelo 3 como se muestran a continuación. La diferencia notable es la ubicación de posición de los agujeros para colocar las pistolas de aire (Figura 11).

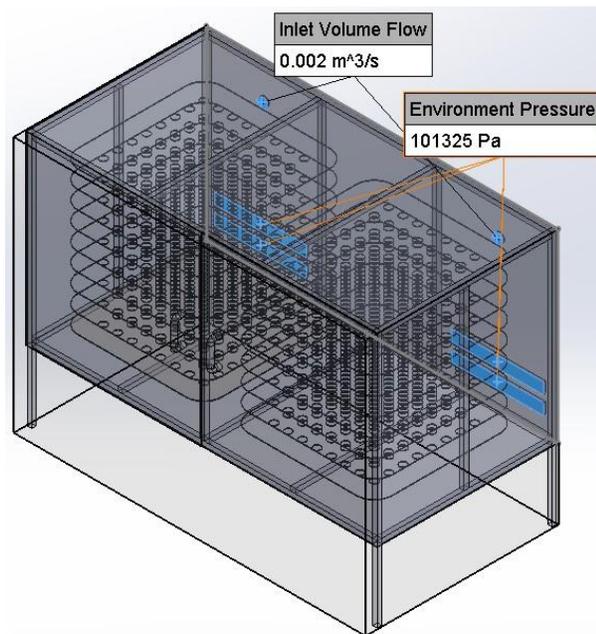


Figura 11. Vista isométrica de las condiciones de frontera y de malla del Modelo 4.

9.3. Construcción de un prototipo del deshidratador y evaluación la distribución de la temperatura del aire en su interior.

9.3.1. Sistema Mecánico.

Tras llevar a cabo las simulaciones en SolidWorks, se seleccionó la geometría del Modelo 4, el cuál que ofreció la mejor distribución de aire para el proceso de secado. Para la construcción del prototipo, se eligió un perfil tubular rectangular (PTR) de acero negro, con dimensiones de una pulgada (Figura 12).



Figura 12. Tubo PTR para la construcción del deshidratador.

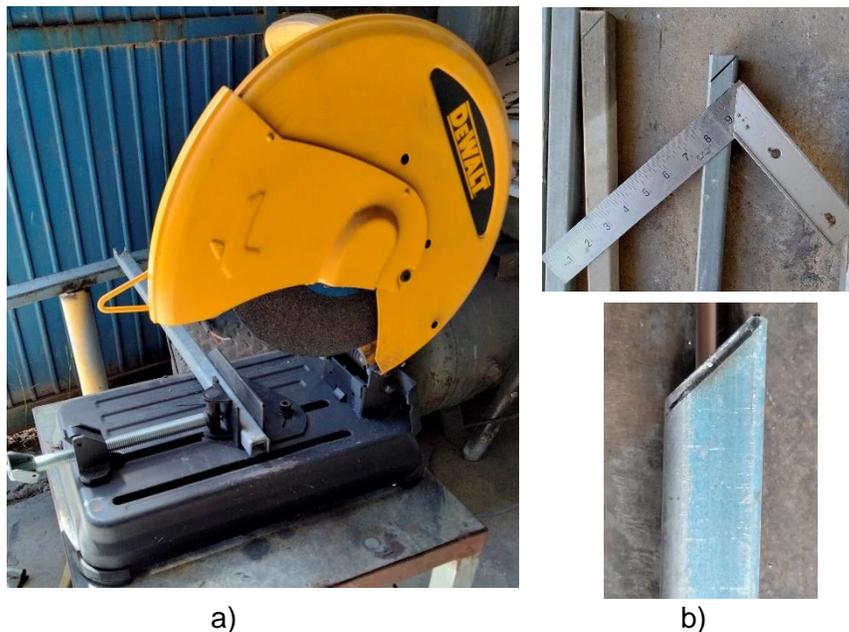


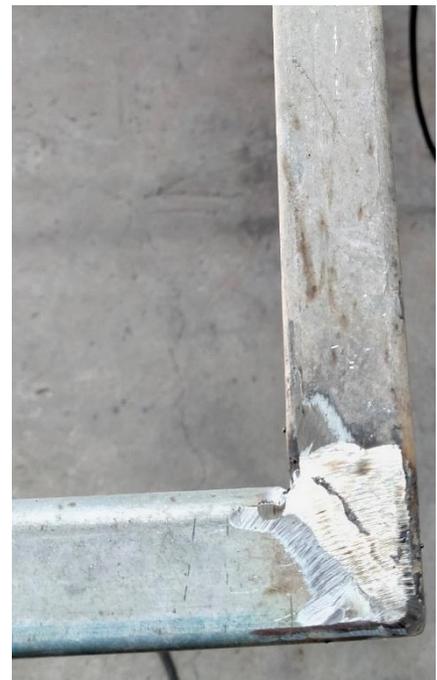
Figura 13. Cortes realizados a los tubos: a) transversal y b) 45°

Posteriormente, se cortó en segmentos de las dimensiones requeridas (Figura 13a) y se realizaron cortes a 45° para ensamblarlos en forma de cuadro (Figura 13b).

Se unieron los distintos PTR para hacer un marco rectangular. Se empleó una máquina INFRA de soldadura por arco eléctrico protegido (SMAW, por sus siglas en inglés) con un electrodo E6013 para aceros suaves de uso general (Figura 14a). Para eliminar el excedente de soldadura y obtener un mejor acabado superficial, se utilizó una lijadora con esmeril (Figura 14b).



a)



b)

Figura 14. a) Marco unido por soldadura, b) acabado de las uniones.

La estructura del deshidartador está formada por varios PTR soldados, que soportan el peso del equipo. Además, se añadieron tubos verticales para evitar deformaciones (Figura 15). Se utilizaron láminas de calibre #18 (1.2 mm de grosor) para las paredes del equipo. Tanto la estructura como las láminas fueron pintadas de gris para protegerlas contra la oxidación, y se añadieron ruedas en las cutaro patas para facilitar el desplazamiento del equipo.



Figura 15. Vista frontal isométrica de la estructura mecánica del deshidratador.

Se colocaron pijas de 3/4 de pulgada con cabeza de cruz con un taladro para fijar las láminas, proporcionando el soporte necesario. Además, dado que el equipo debía estar sellado, se utilizó silicón de alta temperatura para adherir las láminas al perfil tubular rectangular (PTR) y evitar pérdidas de calor (Figura 16).



Figura 16. Material utilizado: taladro, pijas de 3/4 de pulgada y silicón de alta temperatura.

Las pijas se distribuyeron de manera uniforme a lo largo de las láminas, alineándolas con los PTR. Este procedimiento se realizó para asegurar una fijación firme, proporcionando estabilidad a las láminas y evitando que se deformen o pandeen (Figura 17).



Figura 17. Vista lateral del deshidratador con las láminas colocadas con pijas.

Para garantizar un adecuado flujo de aire en el interior del equipo, se realizaron los orificios para la entrada de aire caliente, utilizando un disco de corte. Este aire es suministrado por las pistolas STEINEL 2220 E, ubicadas en la parte posterior del deshidratador. Adicionalmente, para facilitar la salida del aire y evitar turbulencias, se realizaron cortes rectangulares en la parte inferior de la misma lámina (Figura 18).



a)



b)

Figura 18. Vistas de las entradas y salidas de aire del deshidratador: a) interior y b) posterior.

Para la construcción de las puertas, se seleccionaron láminas de calibre #20 (0.9 mm de grosor), las cuales se cortaron a las dimensiones requeridas, las superficies fueron limpiadas y lijadas para mejorar el acabado, y se fijaron a marcos cuadrados para mejorar el sellado en el equipo, y minimizar las pérdidas de calor (Figura 19).

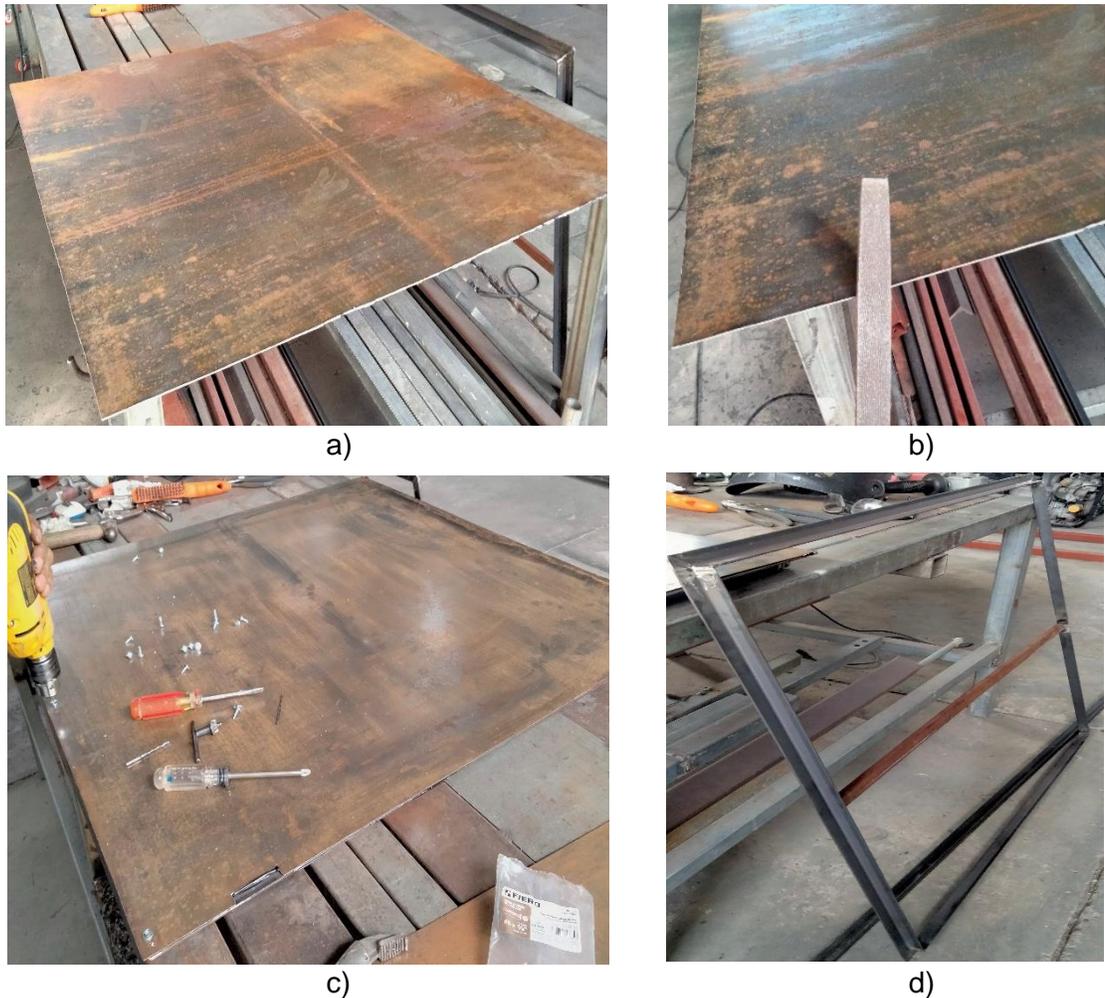


Figura 19. Acondicionamiento de láminas para la construcción de las puertas: a) limpieza del óxido, b) limado de asperezas, c) colocación de pijas y d) marcos de las puertas.

Se utilizaron dos bisagras de 3/8 de pulgada de diámetro en cada lado de la puerta para fijarlas firmemente al marco. Las bisagras se instalaron de manera alternada, con el fin de evitar que se desprendieran fácilmente durante el uso. Posteriormente,

las puertas se pintaron para prevenir la oxidación y mejorar el acabado estético del equipo. (Figura 20)



a)



b)

Figura 20. Proceso de colocación de las puertas del deshidratador: a) instalación de los marcos con bisagras y b) aplicación de pintura.

Para instalar las pistolas de calor, se fabricaron dos bases con forma de “L”, las cuales se fijaron a la lámina mediante el uso de pijas y abrazaderas para asegurar que no giren y así brindar el soporte adecuado. (Figura 21).



a)



b)

Figura 21. Base para pistolas de calor: a) base en forma de “L”, b) pistola con abrazadera.

Para minimizar las pérdidas de calor en el interior del equipo, se implementaron dos broches de presión en las puertas de lámina, lo que asegura un cierre más firme. Adicionalmente, se aplicó cinta de sellado de 3/8 de pulgadas en los marcos de las puertas, lo que refuerza la hermeticidad y contribuye a mantener una mayor eficiencia térmica en el sistema (Figura 22).



Figura 22. Instalación de broches de presión en las puertas.

Se instalaron un par de manijas en las láminas para facilitar la apertura y el cierre del equipo, mejorando su funcionalidad ya que permiten un manejo más cómodo y seguro (Figura 23). Para reducir las pérdidas de calor en la parte posterior del equipo, se instalaron dos tapas de metal en los huecos existentes, una en cada lado (Figura 24).



Figura 23. Vista frontal del equipo con manijas instaladas.



Figura 24. Vista posterior del equipo con tapas.

9.3.2. Sistema de control.

Se seleccionó un control ON/OFF para el deshidratador, debido a que en esta etapa el enfoque es garantizar y evaluar la geometría optimizada. Se utilizó el controlador MT-512E-2HP el cual cuenta con un modo de calefacción y trabaja a 120V AC (Figura 25). El controlador se programó para activar las pistolas de calor a 55°C con un desfase de $\pm 0.2^\circ\text{C}$, es decir a 54.8°C se activarán. Esto se realizó con el fin de mantener un rango de temperatura entre 50 y 60°C necesarias para el proceso de secado de jitomates según usó como, las características técnicas se reportan en su manual de uso (Full Gauge, 2016).



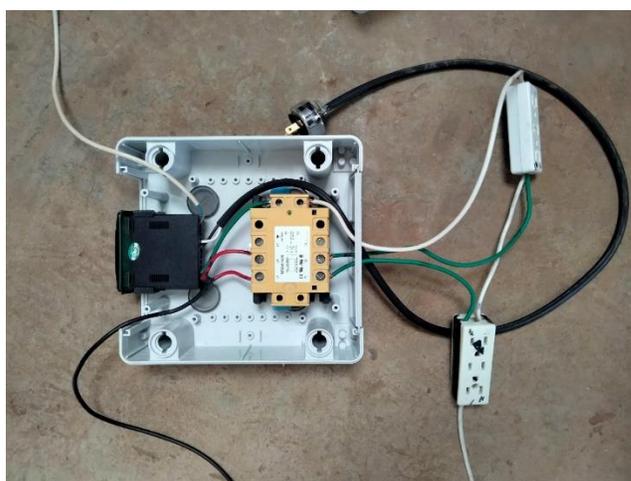
Figura 25. Controlador MT-512E-2HP, recuperado de Full Gauge (2016).

Debido a que el controlador MT-512E-2HP cuenta con una única salida de activación para motores, se optó por emplear el relevador de estado sólido trifásico RZ3A de la marca Carlo Gavazzi (Figura 26). Este dispositivo permite la conexión de las dos pistolas de calor, asignando cada una a una fase de la línea eléctrica, evitando pérdidas de la potencia. Los diagramas de conexión y las especificaciones técnicas se encuentran en el manual de usuario (Carlo Gavazzi, 2014).



Figura 26. Relevador de estado sólido RZ3A, recuperado de Carlo Gavazzi (2014).

El controlador se conectó al relé y a las pistolas de calor, garantizando un control eficiente del sistema. Para prevenir cortocircuitos, todos los componentes se colocaron dentro de una caja de plástico aislante, en la cual se realizaron las conexiones eléctricas adecuadas, asegurando tanto la seguridad como la organización del circuito. A continuación, se presentan las conexiones físicas realizadas (Figura 27).



a)



b)

Figura 27. Conexiones eléctricas del sistema de control al relevador y a las pistolas de calor: a) caja abierta y b) caja cerrada.

En la Figura 28 se presenta el prototipo construido del deshidratador de jitomate, mostrando su diseño final.



Figura 28. Vista frontal del deshidratador con el sistema de control instalado.

9.3.3. Evaluación de la distribución del aire en el interior del deshidratador.

Para probar el funcionamiento del equipo, se realizó un ciclo de secado de 16 horas con jitomates en diferentes estados de maduración. Los cuales se cortaron en rodajas y se acomodaron en cuatro charolas (Figura 29 y 30). Se monitoreó la temperatura y humedad relativa con un registrador de datos de Elitech GSP-6 (Figura 31).

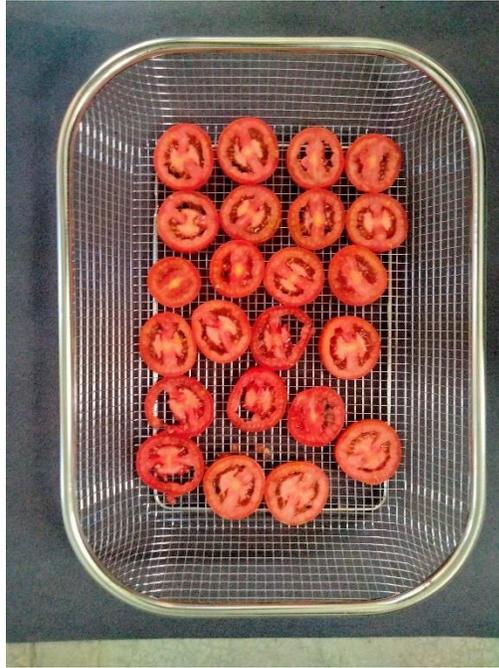


Figura 29. Jitomates rebanados con un punto adecuado de madurez.



Figura 30. Charolas colocadas dentro del deshidratador para prueba de secado.



Figura 31. Registrador de datos GSP-6 de temperatura y humedad marca Elitech.

9.3.4. Evaluación de la calidad del proceso de deshidratación y del gasto energético del deshidratador.

Se empleó el software MATLAB versión 2024b con licencia estudiantil para determinar el color de frutos de jitomate utilizando el espacio de color $L^*a^*b^*$, ampliamente utilizado en la evaluación de alimentos por su precisión en la representación del color. Para facilitar el proceso de segmentación, se utilizó la herramienta Color Thresholder, que permite seleccionar automáticamente los píxeles de la imagen según los umbrales de color definidos. Las imágenes fueron capturadas con un fondo negro para minimizar interferencias en la medición cromática. Posteriormente, se eliminaron los píxeles que no fueran rojos (Figura 32 y 33). En la evaluación de la textura, se estableció como criterio deseado que los jitomates deshidratados presentaran una crocancia similar a la de una hojuela de papa frita, pero sin la utilización de aceite. Esta característica busca mejorar la aceptación sensorial del producto, asociando una textura atractiva con un perfil de botana saludable.

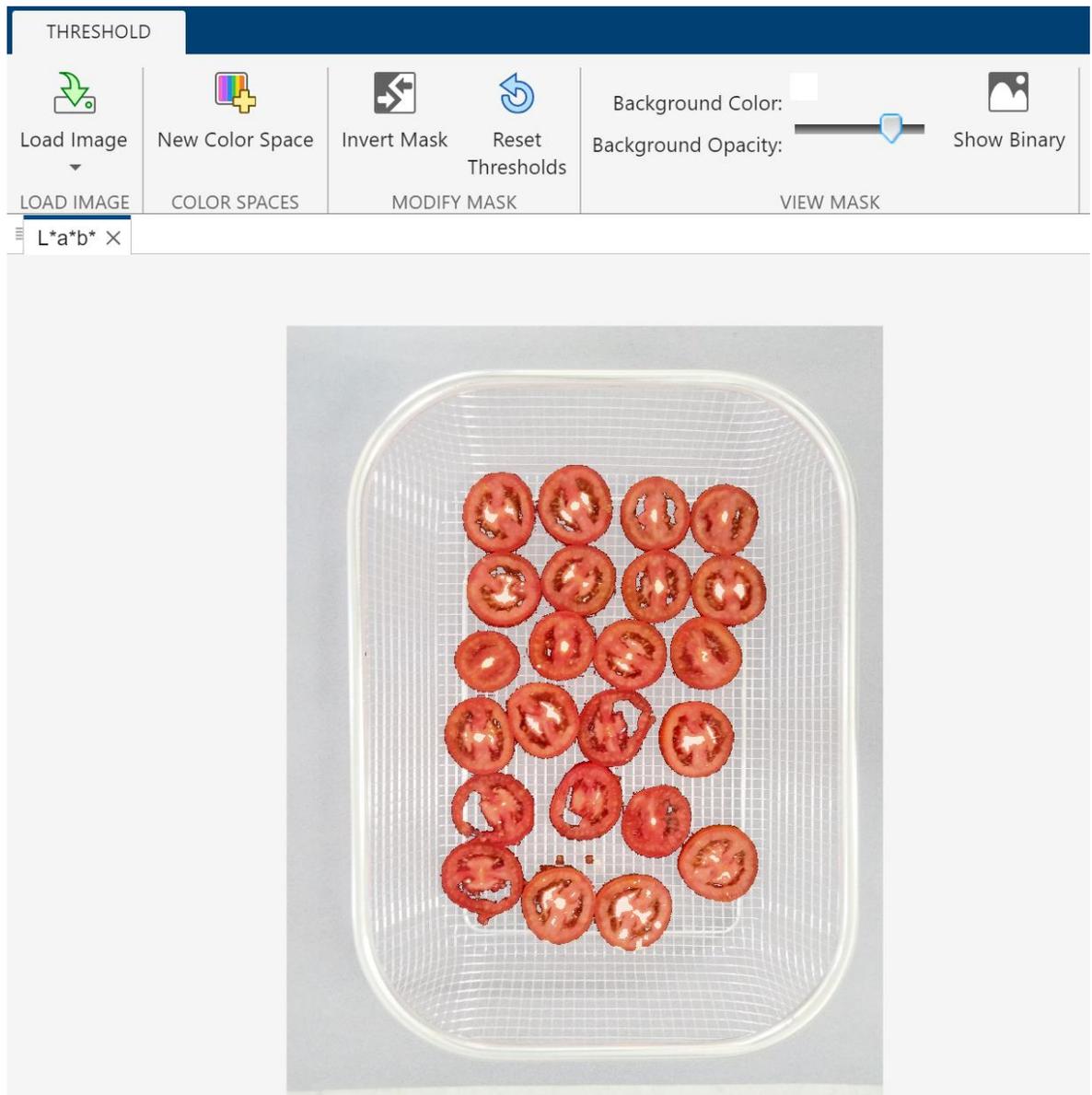


Figura 32. Herramienta Color Thresholder utilizada para identificar los píxeles correspondientes al fruto fresco. Se seleccionó un fondo translúcido para visualizar la ubicación de la charola.

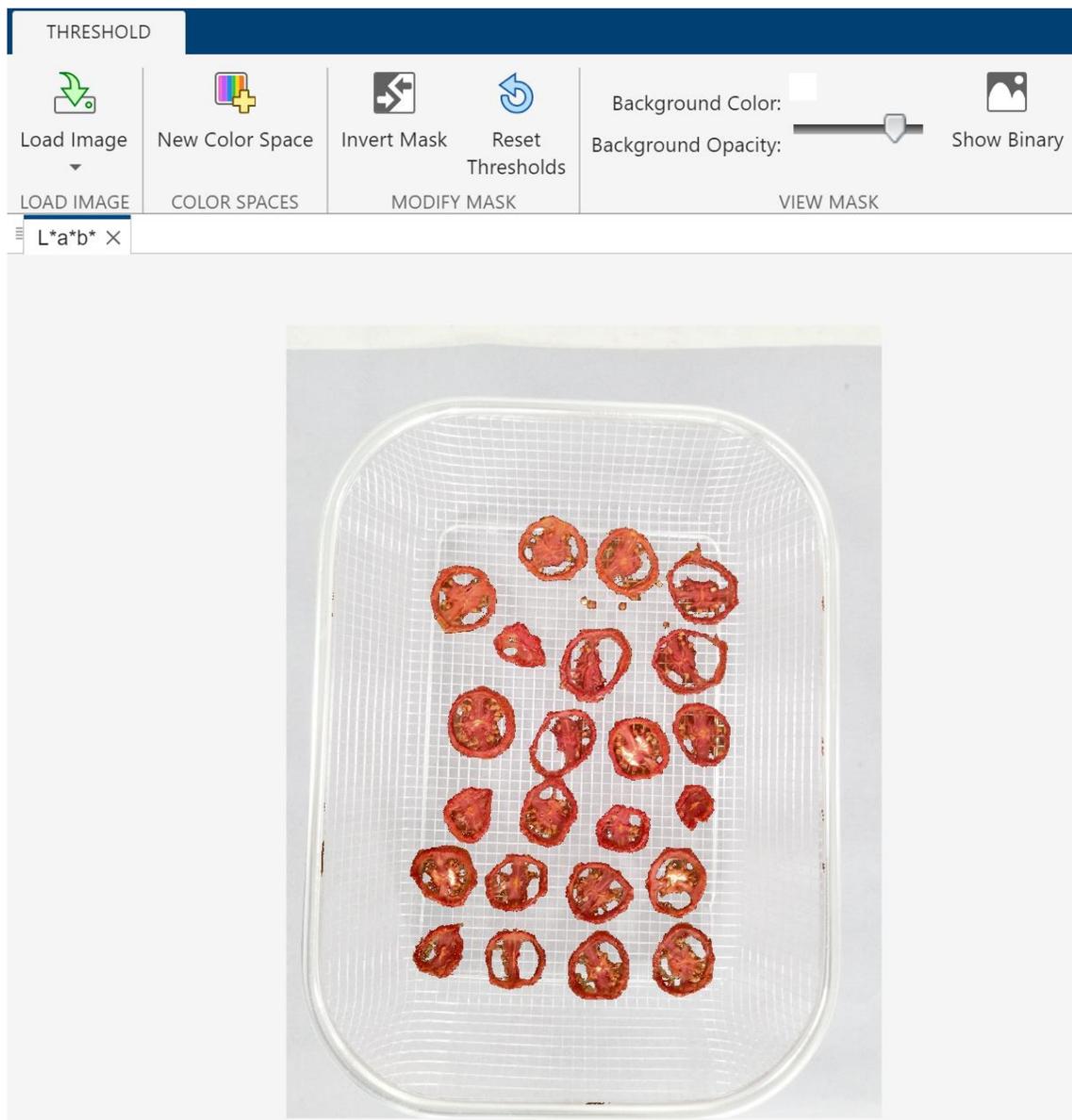


Figura 33. Herramienta Color Thresholder utilizada para identificar los píxeles correspondientes al fruto seco después de 16 horas en el deshidratador.

El gasto energético de una pistola de calor es de 1.5 kW h, como se están utilizando dos como fuente energética, el gasto total del equipo es de 3 kW h. Para determinar el área real de sacado, se midieron con un flexómetro las charolas de acero, cuyas dimensiones son de 0.3 m de largo por 0.2 m de ancho. Fue posible acomodar 4 charolas a lo ancho del equipo, dejando suficiente espacio para maniobrar

cómodamente. Igualmente, es posible acomodar 3 charolas a lo largo debido a las dimensiones del equipo. Finalmente, el equipo fue diseñado para soportar 9 niveles de charolas de manera vertical, por lo que para calcular el área de secado real nos queda descrito en la Ecuación 9:

$$A_{\text{secado}} = 4 * 3 * 9 * 0.03 \text{ m} * 0.02 \text{ m} \quad \text{Ecuación (9)}$$

$$A_{\text{secado}} = 6.48 \text{ m}^2$$

Utilizando la Ecuación 4 para calcular la eficiencia tenemos que:

$$\eta_E = \frac{6.48 \text{ m}^2}{3 \text{ kW h}^{-1}} = 2.16 \text{ m}^2 \text{ kW}^{-1} \text{ h}^{-1}$$

10. RESULTADOS Y DISCUSIONES

10.1 Simulación térmica

Estudios comparativos sobre deshidratadores de bandejas indican que un rango óptimo de flujo de aire se sitúa entre 0.003 y 0.18 m³s⁻¹. Sin embargo, la distinción clave entre nuestros diseños y los modelos existentes es el volumen significativamente mayor de la cámara de secado, que es aproximadamente 10 veces mayor que la capacidad típica de otros dispositivos descritos (Arun et al., 2019; Castaño-Rodríguez et al., 2018; Ouaabou et al., 2020). Los resultados obtenidos con la herramienta de simulación de flujo se presentan en la figura 34. Para conseguir una distribución uniforme del aire en toda la cámara de secado, se seleccionó un caudal de 0.08 m³s⁻¹, que se encuentra dentro del rango mencionado anteriormente. Este valor se seleccionó después de hacer varias simulaciones, durante las cuales se determinó que un caudal inferior no sería suficiente para distribuir uniforme el aire dentro de la cámara de secado; un que un caudal superior, evitaría el calentamiento del aire a una temperatura superior a 40°C.

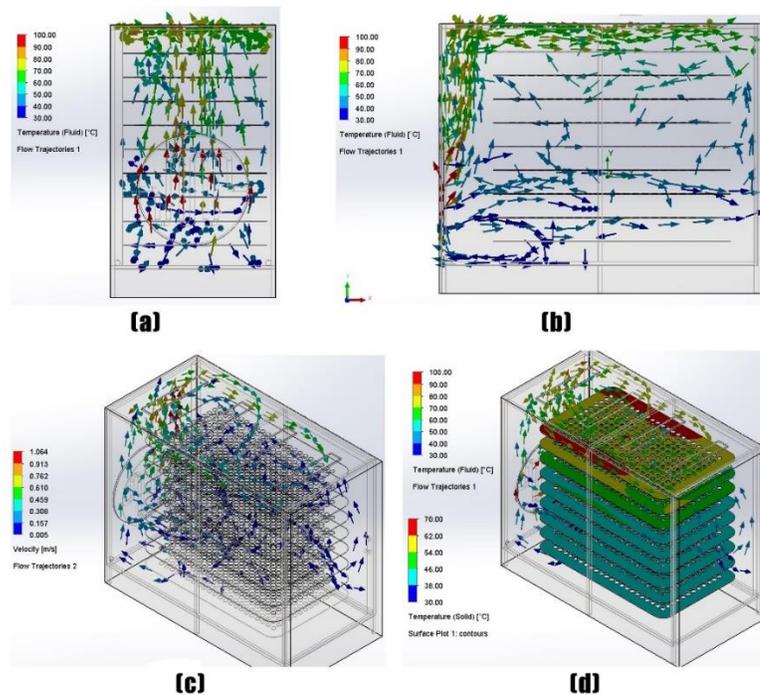


Figura 34. Diferentes vistas de la temperatura del aire del deshidratador Modelo 1, incluyendo las temperaturas de las bandejas: (a) frontal, (b) lateral, (c) isométrica, y (d) isométrica.

La temperatura en la parte inferior del equipo se mantiene en 30°C, mientras que la temperatura en la parte superior alcanza los 70 a 80°C. El aire de entrada, donde se encuentra la fuente de calor, es la parte más caliente, alcanzando más de 100°C. Adicionalmente, las temperaturas de las bandejas varían, lo que demuestra un posible impacto en los productos biológicos. En las seis bandejas iniciales, la temperatura se mantiene dentro del intervalo óptimo de 38 a 42°C, lo que indica unas condiciones térmicas satisfactorias. La séptima bandeja alcanza temperaturas entre 46 y 54°C, mientras que las dos últimas bandejas tienen temperaturas entre 46 y 70 °C, que son problemáticas para los productos agrícolas. La velocidad mínima del aire en la cámara de secado es de 0.005 m s⁻¹, mientras que la máxima es de 1.06 m s⁻¹ (Figura 34).

Los problemas detectados en el modelo inicial se tuvieron en cuenta durante el desarrollo del nuevo deshidratador. Esta vez se eligió una geometría horizontal y se colocaron dos ventiladores para garantizar una distribución óptima del aire. La

figura 34 ilustra los resultados de la simulación de flujo. Puede observarse que la distribución del aire en este caso es superior a la del modelo anterior. El caudal más lento de $0.03 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ garantiza que el aire se caliente en un rango óptimo. Además, la vista isométrica revela la presencia de vórtices en las esquinas del equipo, condición que debe modificarse.

En la vista lateral del deshidratador, destaca la distribución de la temperatura del aire. En la parte inferior, la temperatura oscila entre 40 y 60 °C, ideal para el proceso de deshidratación de alimentos. En la sección media, la temperatura se encuentra entre 60 y 70°C, con picos ocasionales que alcanzan entre 70 y 80°C. Es fundamental tener en cuenta que las temperaturas superiores a 70 °C pueden causar daños importantes a los productos biológicos. A la salida y a la entrada del deshidratador, las temperaturas más altas superan los 100 °C, mientras que las más bajas se sitúan en torno a los 30 °C.

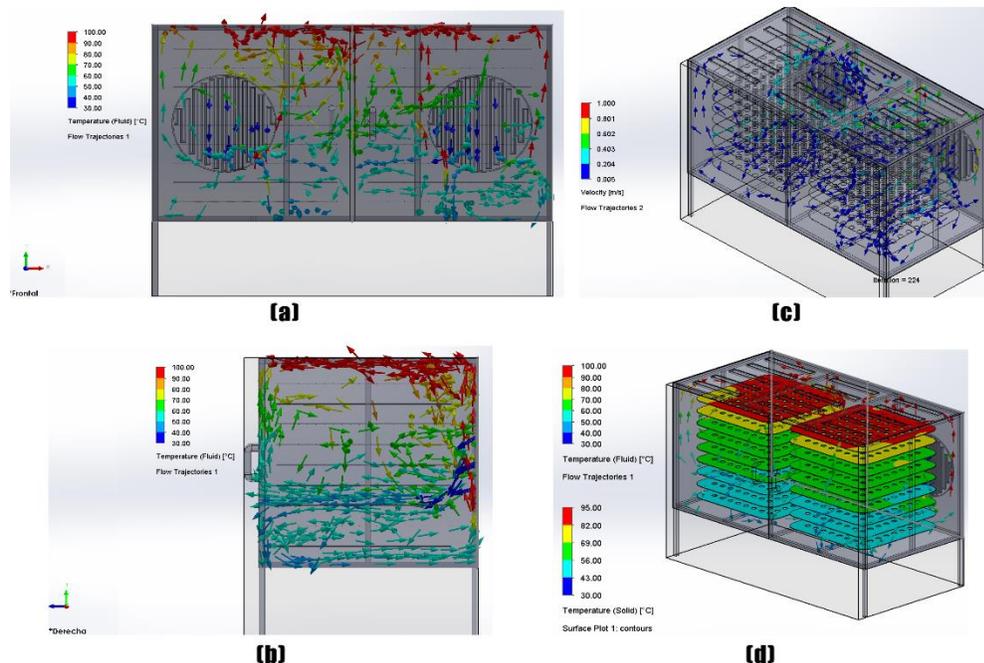


Figura 35. Diferentes vistas de la temperatura del aire del deshidratador Modelo 2, incluyendo las temperaturas de las bandejas: (a) frontal, (b) lateral, (c) isométrica, y (d) isométrica.

También se describen las temperaturas de las bandejas, observándose que oscilan entre 43 y 56 °C para las tres bandejas iniciales, y entre 56 y 69°C para las cuatro siguientes. La temperatura de la segunda bandeja se mantiene entre 69 y 82°C, lo que representa un riesgo importante de daño para los productos biológicos. Además, la mayor parte de la última bandeja se calienta a 95°C, lo que indica que puede ser necesario reubicar el ventilador. La velocidad mínima del aire en la cámara de secado es de 0.005 m s⁻¹, mientras que la máxima es de 0.97 m s⁻¹. Se puede observar que, en la mayor parte de la cámara, la velocidad se sitúa entre 0.005 y 0.3 m s⁻¹, lo que indica que el aire se mueve más lento que en el modelo 1 (Figura 35).

Con un flujo vertical en la parte superior, se podría optimizar el uso de la energía debido a que el aire caliente tiende a ascender, permitiendo un calentamiento más uniforme del equipo. En la Figura 35 se evaluó esta configuración mediante una simulación térmica, mostrando una buena distribución del aire dentro de la cabina de secado.

En las vistas frontal (a) y lateral (b) de la Figura 35, se observa el comportamiento del aire, identificándose áreas donde la velocidad es insuficiente para alcanzar ciertas zonas. Este fenómeno se confirma con la Figura 35(c), donde se muestra que la velocidad general del flujo de aire se mantiene por debajo de 0.0085 m·s⁻¹, con excepción de algunos puntos que alcanzan 0.5 m·s⁻¹ debido a la geometría del equipo, lo que puede provocar la formación de vórtices en la región cercana a la puerta. Asimismo, al analizar la distribución de temperaturas en las bandejas, representada en la Figura 35(d), se observa que las tres primeras bandejas alcanzan una temperatura de hasta 137°C. Las siguientes tres bandejas muestran un rango de calentamiento entre 90 y 122°C, mientras que las últimas mantienen temperaturas entre 57 y 77°C. Estas condiciones son inadecuadas para el proceso de deshidratación, ya que no garantizan una uniformidad térmica óptima para el tratamiento del jitomate.

Tras analizar las ventajas y fallas de los modelos anteriores, se optó por ubicar la entrada de aire en la parte superior posterior del equipo. Esta modificación busca aprovechar de manera más eficiente la geometría del sistema, optimizando la distribución del flujo de aire dentro de la cabina de secado. En la Figura 36 se presentan los resultados de la simulación térmica, donde se notan mejoras significativas tanto en la distribución del aire y como en la temperatura en comparación con los diseños previos. Esta nueva configuración permite un flujo más uniforme, reduciendo las zonas de baja velocidad y mejorando las condiciones para el proceso de deshidratación.

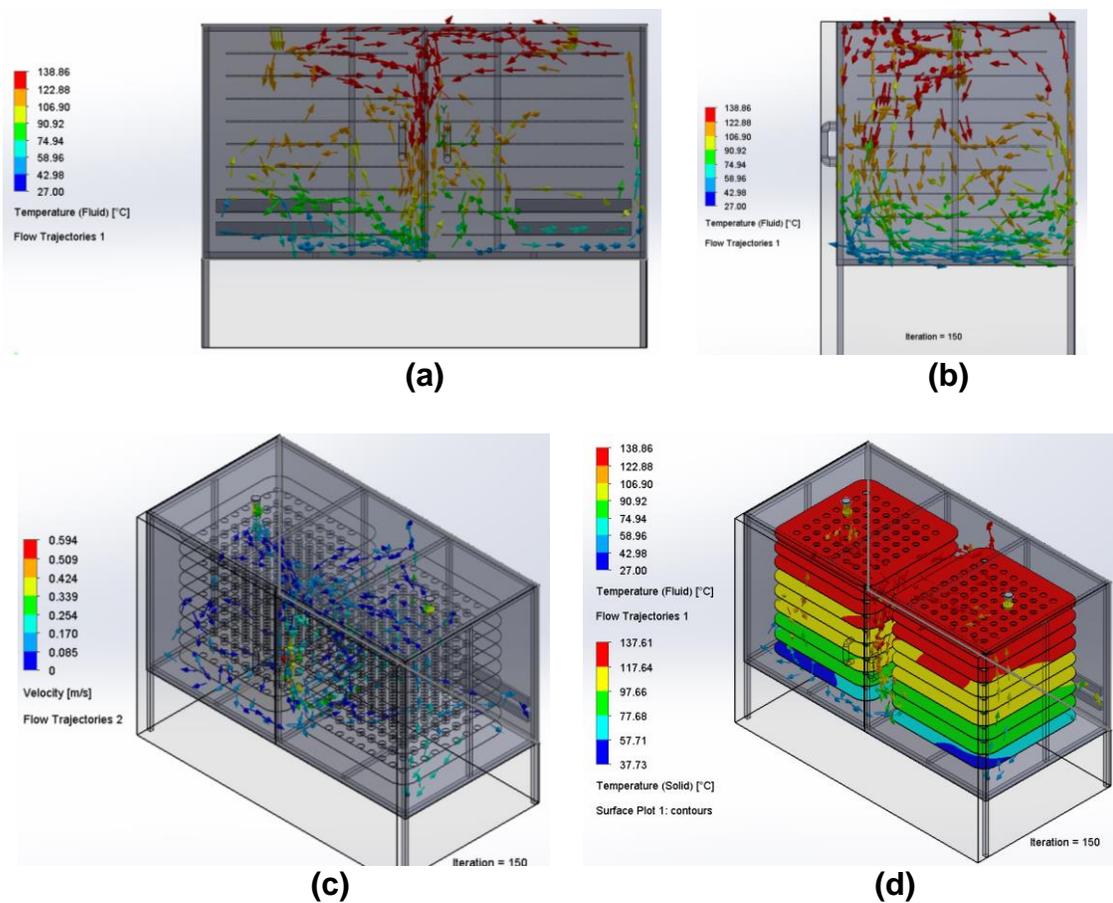


Figura 36. Diferentes vistas de la temperatura del aire del deshidratador Modelo 3, incluyendo las temperaturas de las bandejas: (a) frontal, (b) lateral, (c) isométrica, y (d) isométrica.

En la Figura 36 (a) y (b) se puede resaltar que la distribución del aire es mucho mejor que la propuesta en la Figura 35. Se decidió colocar Por último se decidió colocar la entrada de aire en la parte posterior superior con el fin de mejorar el flujo de aire. En la Figura 37, se muestra esta nueva configuración y los resultados de la simulación.

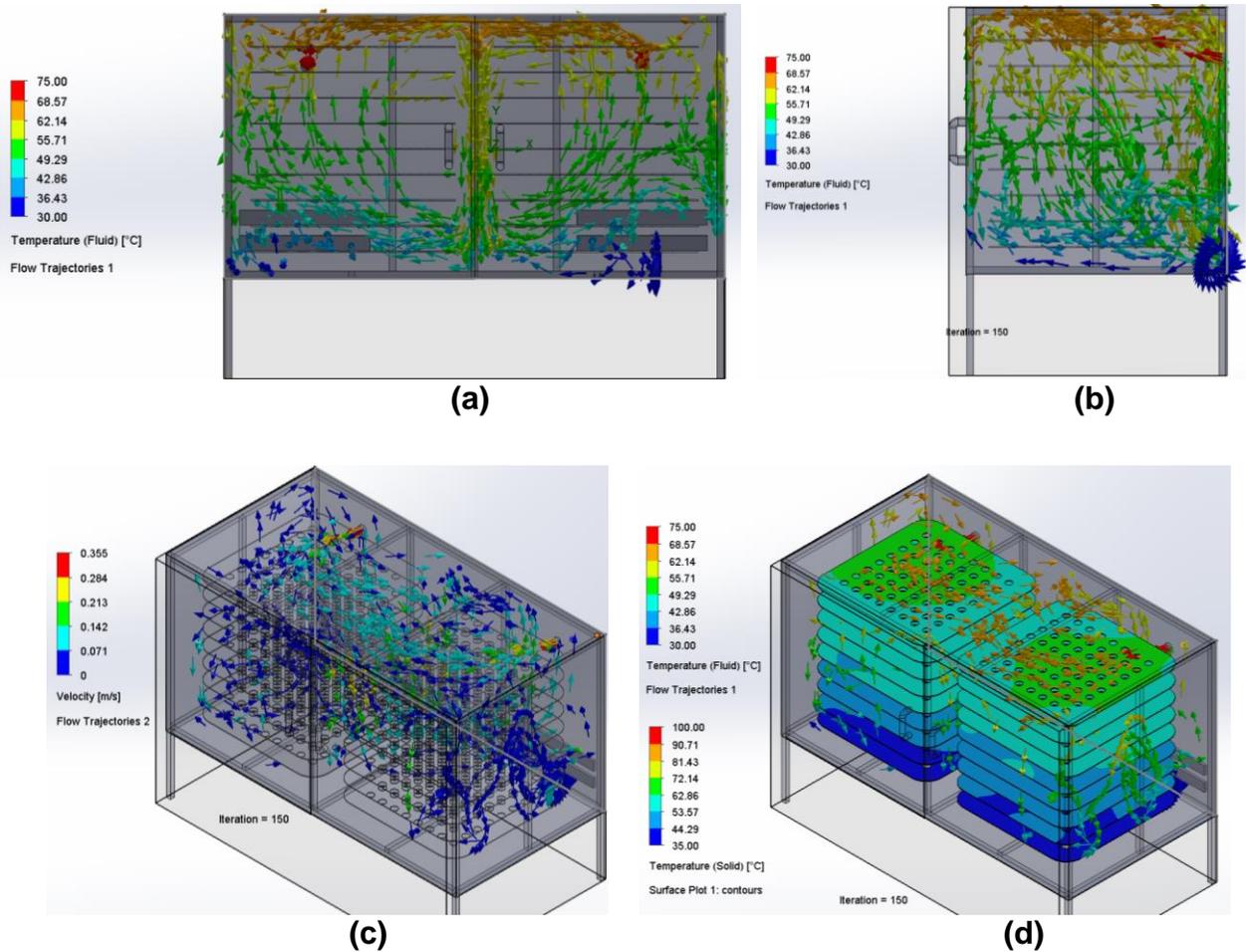


Figura 37. Diferentes vistas de la temperatura del aire del deshidratador Modelo 4, incluyendo las temperaturas de las bandejas: (a) frontal, (b) lateral, (c) isométrica, y (d) isométrica.

Se realizó un análisis comparativo de las temperaturas máximas y mínimas del aire, las velocidades y las temperaturas de las bandejas de cada versión del equipo. Se compara el modelo 2 y el modelo 4 los cuales fueron los mejores resultados de las simulaciones. Los resultados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Comparación de la temperatura de diferentes partes del Modelo 2 y 4.

Variable	Modelo 2	Modelo 4
Temperatura mínima	40°C	30°C
Temperatura máxima	100°C	75°C
Temperatura mínima de charolas	43°C	35°C
Temperatura máxima de charolas	95°C	66°C
Velocidad mínima	0.005 m s ⁻¹	0.0005 m s ⁻¹
Velocidad máxima	0.97 m s ⁻¹	0.355 m s ⁻¹

La deshidratación es un proceso importante, debido a que puede prolongar la vida útil de los productos agrícolas y permitir la venta de productos fuera de temporada. Este proceso permite reducir en un tercio las necesidades de espacio para el almacenamiento y el transporte de alimentos. Con la implantación de energías renovables y sistemas inteligentes de control automático, se pueden reducir los costes energéticos del proceso (Abdenouri et al., 2022; Asnaz & Dolcek, 2021; Castaño-Rodríguez et al., 2018; Çiftçiöğlü et al., 2020; Mohana et al., 2020).

En estudios similares, se ha recomendado que los equipos presenten una distribución de temperatura y velocidad más uniforme en sus componentes internos (Castaño-Rodríguez et al., 2018; Mohana et al., 2020). En el caso del Modelo 2, la temperatura de la cámara de secado se distribuye uniformemente a través de las superficies de las bandejas, alcanzando una temperatura aproximada de 60 °C. Sin embargo, es necesario realizar modificaciones para mejorar el proceso de secado en la parte superior.

Otros diseños utilizan una cámara de secado más pequeña. Se informó de un secador de 0.6 m de largo, 0.35 m de ancho y 0.5 m de alto, con un volumen de 0.105 m³, y con las bandejas dispuestas verticalmente y separadas 0.04 m (Mohana et al., 2020). Otro secadero se diseñó como de baja capacidad (10-15 kg de producto), utilizando seis bandejas. Las dimensiones de su cámara de secado son 0.77 m de largo, 0.65 m de ancho y 1.085 m ± 0.125 m de alto, con un volumen aproximado de 0.543 m³ (Devi & Kalnar, 2021). Otro secador tiene unas dimensiones

de 1.25 m de largo, 0.85 m de ancho, 0.63 m de alto y un volumen de 0.67 m³ (Poonia et al., 2018). También se informa de una configuración de equipo mayor, que comprende una cámara de secado con una altura de 1.4 m, una profundidad de 0.90 m, una anchura de 0.5 m y un volumen de 0.63 m³ (Tagnamas et al., 2020). Esta última cámara es una de las más grandes, aunque la configuración del Modelo 2 es tres veces mayor.

La cámara de secado del Modelo 1 tiene un volumen de 2.11 m³, que es significativamente mayor que los diseños de los que se ha informado anteriormente. El volumen de secado del modelo 2 es de 2.02 m³. El secador pequeño de tipo armario es adecuado para secar pequeñas cantidades, mientras que el secador de estantes múltiples se emplea a mayor escala (Sharma et al., 1995). Este enfoque representa una metodología novedosa, ya que permite emplear el modelo para una producción a mayor escala, ofreciendo así una alternativa viable para reducir los residuos de cosecha en la producción de pequeños invernaderos.

El sistema de secado solar puede emplearse en volúmenes de cultivo limitados o a escala doméstica (Sharma et al., 1995). Los sistemas solares están diseñados para un secado de baja capacidad, pero son ecológicamente viables para los agricultores, manteniendo la calidad del producto (Catorze et al., 2022). Un secador solar pequeño utiliza el equivalente a 0.12 kW del sol y puede calentar hasta 94.8 °C (Salisu et al., 2019).

Desgraciadamente, el modelo 1 fue incapaz de alcanzar una temperatura de secado adecuada. El modelo 2, sin embargo, emplea dos fuentes de calor de 2.5 kW y ha demostrado ser suficiente para mantener una temperatura de 60 °C dentro del equipo central. Además, una ventaja añadida del secador eléctrico es que no está sujeto a las fluctuaciones ambientales y puede funcionar de forma continua, incluso durante las horas nocturnas. Aunque los sistemas de secado solar son sostenibles, su implantación para aplicaciones a nivel comercial es laboriosa (Mohana et al., 2020).

Otro enfoque para el uso eficiente de la energía es la utilización de sistemas híbridos, que combinan energía solar y eléctrica como fuentes de calor y utilizan sistemas de control automático. Otros estudios han informado de ahorros energéticos de entre el 28 y el 35% sin afectar a las características de calidad de productos como arándanos, frambuesas, tomates, berenjenas, frutos rojos, café, tabaco, té, cacao en grano, arroz y frutos secos (Catorze et al., 2022; Ertekin & Yaldiz, 2004; Jibia, 2015; Mohana et al., 2020; Poonia et al., 2018).

Aunque los Modelos 1 y 2 propuestos no son sistemas híbridos en esta etapa, se está considerando la incorporación de la complementación alternativa con paneles solares para el sistema digital y colectores solares que se utilizan para reducir las áreas de transferencia de calor para versiones posteriores, con la intención de reducir la demanda de energía de los equipos diseñados.

Un diseño adecuado y sencillo es fundamental en los secadores para una utilización eficaz de la energía térmica. Además, el equipo debe ser capaz de procesar de forma diferente una enorme gama de materiales alimentarios (Mohana et al., 2020). El modelo 2 ha demostrado, con los métodos CFD, que mantendrá la temperatura en un rango óptimo para los procesos de secado de productos agrícolas. Cada uno de estos productos tiene un rango de temperatura diferente para el secado, por lo que es muy importante que el equipo pueda adaptarse al producto seleccionado. En el Modelo 2 se debe implementar un sistema de control que permita seleccionar el producto a secar y adaptar la temperatura a dicho producto. Esto debe conseguirse con lógica difusa, que ha demostrado adaptarse a diferentes circunstancias dentro de sistemas no lineales (Abdenouri et al., 2022).

Un buen diseño mecánico y un sistema híbrido de fuentes de calor, combinados con un controlador de lógica difusa, podrían dar como resultado un secador más eficiente. Además, un sistema de mayor tamaño que los propuestos anteriormente podría tener un impacto en la producción de pequeñas explotaciones y ayudar a reducir el desperdicio de la cosecha. Es imprescindible que los modelos posteriores tengan en cuenta estas consideraciones.

Se diseñaron y evaluaron dos modelos de deshidratadores utilizando métodos CFD. El modelo inicial fue incapaz de alcanzar una demanda energética óptima. El aire de entrada requería una cantidad significativa de energía para calentar el dispositivo, y el caudal era difícil de regular. Estos problemas se atribuyeron a la compleja geometría del modelo y a la posición del ventilador.

El segundo modelo tenía un volumen menor y pesaba menos, lo que se consiguió gracias a una geometría más eficiente. Además, se consideraron dos ventiladores y dos fuentes de calor, lo que dio como resultado una mejor distribución de la temperatura del aire. Este modelo es superior, como lo demuestra la simulación CFD, y logra el secado de productos agrícolas en un rango de temperatura de 40 a 70 °C en la mayor parte del equipo, lo que lo hace económicamente viable para escalas de producción mayores que las asociadas a las versiones anteriormente reportadas. En la figura 38, se muestra el prototipo construido y con sistema de control instalado.



Figura 38. Prototipo de deshidratador de bandejas para jitomate.

10.2 Evaluación del prototipo.

Los resultados del programa Tresholder de Matlab para los frutos frescos se muestran a continuación. Se obtuvo que el color estaba en la región rojo con los valores de $L^*=20$ hasta $L^*=100$, $a^*=25$ hasta $a^*=65$ y $b^*=15$ hasta $b^*=55$ (Figura 39).

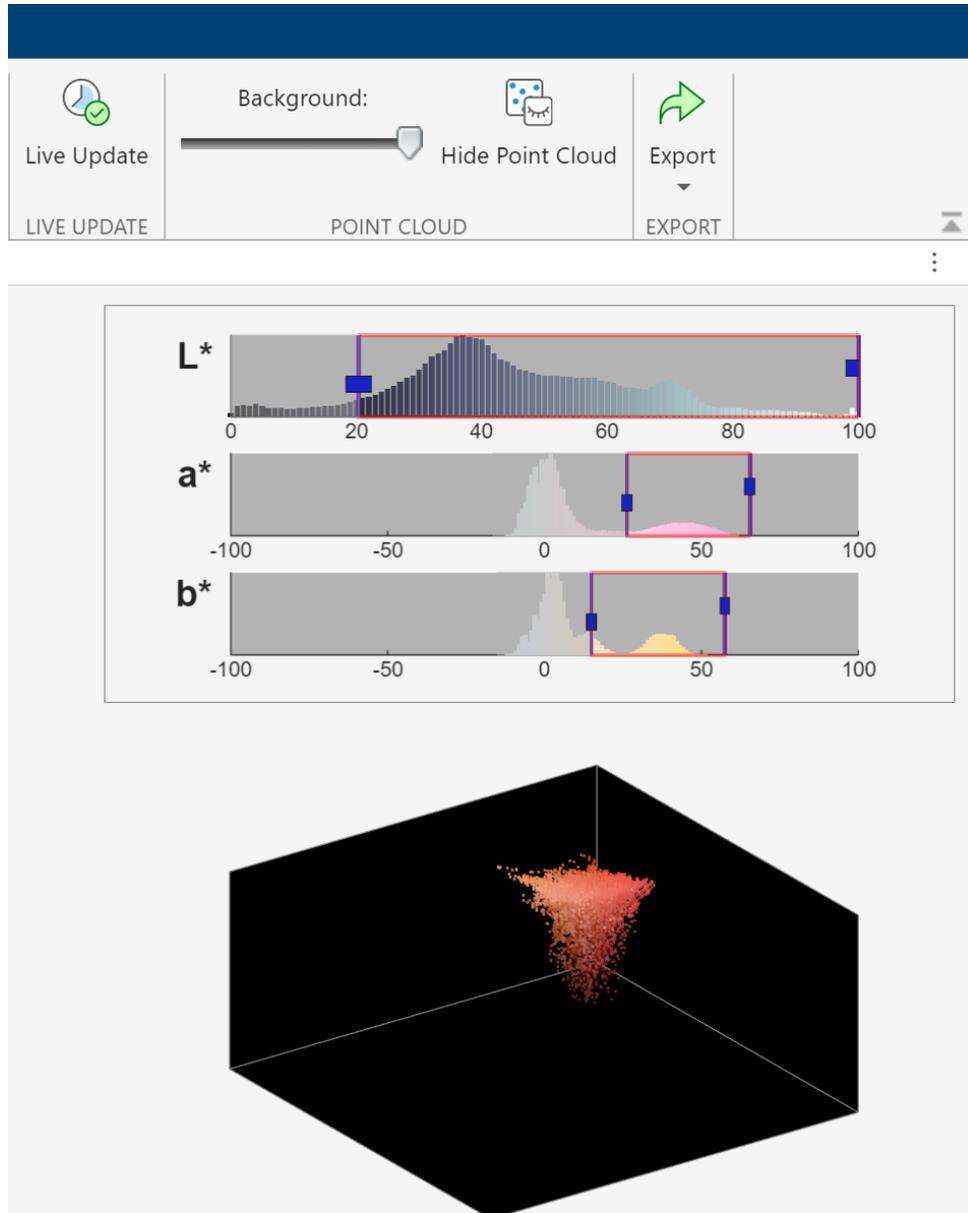


Figura 39. La herramienta Color Thresholder ayuda a determinar la región $L^*a^*b^*$ de la imagen de frutos frescos segmentada y el mapa 3D de la misma escala, para una mejor visualización.

En el caso de los jitomates deshidratados, se determinó que el color se encontraba en una región de rojo con valores de L^* entre 20 y 100, a^* entre 25 y 65, y b^* entre 20 y 50. Estos rangos cromáticos resultaron muy similares a los obtenidos en frutos frescos, con la diferencia de una menor presencia de amarillo en el eje b^* (Figura 40).

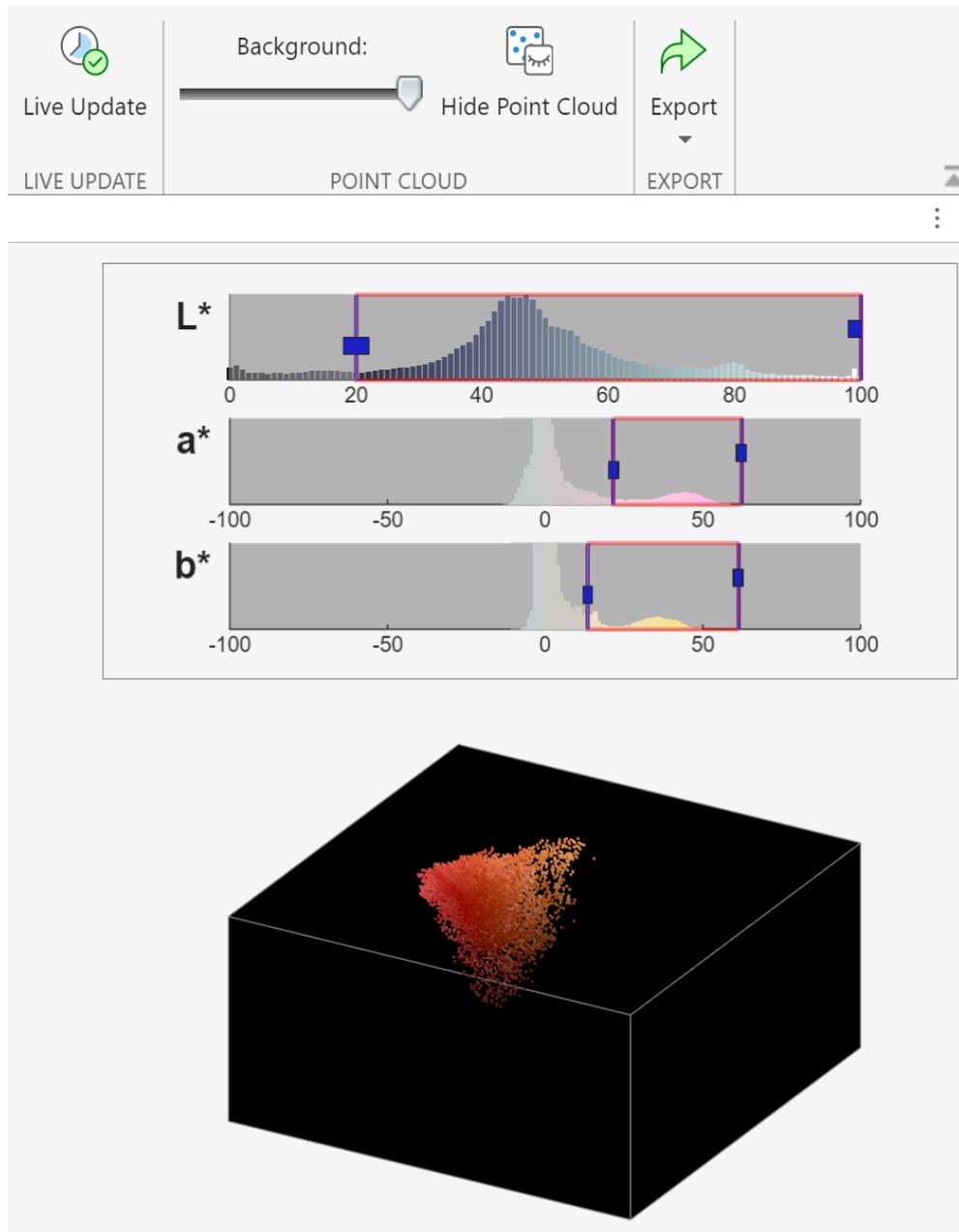


Figura 40. La herramienta Color Thresholder ayuda a determinar la región $L^*a^*b^*$ de la imagen de frutos secos y el mapa 3D de la misma escala.

La reducción en el color amarillo o eje b^* , indica que el proceso de secado se realizó correctamente, ya que un aumento en los valores de b^* al final del proceso, reflejado en tonalidades más amarillas o marrones, sería indicativo de una descomposición o degradación inadecuada del fruto (Jibia, 2015).

La evaluación de la textura de los jitomates deshidratados se realizó mediante un análisis sensorial directo, percibiéndose una textura crujiente y firme, comparable a la de las hojuelas de papa fritas. Esta característica sugiere una deshidratación adecuada, asociada con la reducción significativa del contenido de humedad (Vega-Mercado et al., 2001).

El consumo energético del prototipo de deshidratador es elevado debido a la alta demanda de las pistolas de calor utilizadas en el proceso. No obstante, el cálculo de eficiencia arrojó un valor de 2.16, lo que, al compararse con equipos comerciales y reportes previos (Tabla 1), indica un desempeño general favorable. Este gasto eléctrico se justifica y compensa por el considerable volumen de la cámara de secado del prototipo, lo que permite procesar una mayor cantidad de producto por ciclo, optimizando así su rendimiento.

Al comparar la eficiencia del prototipo de deshidratador con los equipos presentados en la Tabla 1, se observa que solo es superado por dos sistemas: el de Ortiz-Rodríguez et al. (2020), con una eficiencia de 2.18, correspondiente a un equipo híbrido fotovoltaico y de gas LP, y el equipo comercial de Baixin Machinery, completamente eléctrico, con una eficiencia de 2.42. Aunque existen más equipos reportados, su menor eficiencia se atribuye principalmente a su tamaño reducido, diseñado para aplicaciones de laboratorio. En cuanto a los sistemas comerciales, los deshidratadores eléctricos siguen siendo los más utilizados, ya que calentar aire con otras fuentes de energía suele ser costoso. Para futuras mejoras, se recomienda considerar el uso de equipos híbridos con apoyo de gas, el uso de mejores calentadores, aislar el equipo y la implementación de sistemas inteligentes de control, con el fin de optimizar aún más el consumo energético y reducir las emisiones de CO_2 en el proceso de deshidratación.

11. CONCLUSIONES

La simulación computacional demostró ser una herramienta efectiva para la optimización de recursos, permitiendo un uso eficiente de materiales y tiempo durante la construcción del deshidratador. La metodología CFD facilitó la identificación de mejoras en el diseño para optimizar su rendimiento.

Se logró construir un deshidratador de bandejas para jitomate capaz de mantener una temperatura uniforme durante el proceso de secado. Las pruebas de color confirmaron la calidad del proceso, evidenciando la ausencia de tonalidades amarillas o cafés no deseadas, mientras que la textura crujiente resultante es atractiva para su comercialización.

La hipótesis no se cumplió, ya que, aunque se esperaba reducir el consumo energético en comparación con equipos comerciales, solo se logró alcanzar una eficiencia similar. Se recomienda realizar mejoras en el prototipo, como el aislamiento térmico o la implementación de un sistema de control inteligente, para optimizar el consumo energético y mejorar su desempeño.

12. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Abdenouri, N., Zoukit, A., Salhi, I., & Doubabi, S. (2022). Model identification and fuzzy control of the temperature inside an active hybrid solar indirect dryer. *Solar Energy*, 231, 328–342. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.11.026>
- Arun, K. R., Srinivas, M., Saleel, C. A., & Jayaraj, S. (2019). Active drying of unripened bananas (*Musa Nendra*) in a multi-tray mixed-mode solar cabinet dryer with backup energy storage. *Solar Energy*, 188, 1002–1012. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.07.001>
- Asnaz, M. S. K., & Dolcek, A. O. (2021). Comparative performance study of different types of solar dryers towards sustainable agriculture. *Energy Reports*, 7, 6107–6118. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.08.193>
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. Keith. (2011). *Shigley's mechanical engineering design*. McGraw-Hill.
- Carlo Gavazzi. (2014). *Relés de Estado Sólido Industrial, Trifásico Conexión de Paso por Cero Modelo RZ3A*.
- Castaño-Rodríguez, J., Amaya, D., & Ramos, O. (2018). Food Dryer Design and Analysis of Velocity and Temperature Profiles. In *International Journal of Applied Engineering Research* (Vol. 13). <http://www.ripublication.com13578>
- Catorze, C., Tavares, A. P., Cardão, P., Castro, A., Silva, M. E., Ferreira, D. W., Lopes, S., & Brás, I. (2022). Study of a solar energy drying system—Energy savings and effect in dried food quality. *Energy Reports*, 8, 392–398. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.01.070>
- Çiftçioğlu, G. A., Kadirgan, F., Kadirgan, M. A. N., & Kaynak, G. (2020). Smart agriculture through using cost-effective and high-efficiency solar drying. *Heliyon*, 6(2). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03357>
- Dassault Systemes. (2020). *Technical Reference Solidworks Flow Simulation 2021*.
- Devi, T. B., & Kalnar, Y. B. (2021). Design consideration of smart solar dryer for precision drying. *Journal of AgriSearch*, 8(2), 135–138. <https://doi.org/10.21921/jas.v8i2.7297>
- Ertekin, C., & Yaldiz, O. (2004). Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of Food Engineering*, 63(3), 349–359. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2003.08.007>
- Fabani, M. P., Román, M. C., Rodriguez, R., & Mazza, G. (2020). Minimization of the

- adverse environmental effects of discarded onions by avoiding disposal through dehydration and food-use. *Journal of Environmental Management*, 271.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110947>
- FAO. (2021). The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture – Systems at breaking point. In *The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture – Systems at breaking point (SOLAW 2021)*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cb7654en>
- Full Gauge. (2016). *Controlador e Indicador Digital para Calefacción o Refrigeración con Deshielo Natural por Parada del Compresor*.
- Geankoplis, C. J. (2006). *Procesos de Transporte y Principios de Procesos de Separación (Incluye Operaciones Unitarias)* (cuarta edición). Compañía Editorial Continental.
- Jamaledine, T. J., & Ray, M. B. (2010). Application of computational fluid dynamics for simulation of drying processes: A review. *Drying Technology*, 28(2), 120–154.
<https://doi.org/10.1080/07373930903517458>
- Jibia, A. U. (2015). Microcontroller-based fruit drying system. *Technology & Education (JOSTE)*, 3(3). www.atbuftejoste.com
- Madhankumar, S., Harish, V., Jayanth, C. P., Manikandan, R., & Aswin, N. (2021). Automated Moisture Remover for Drying Agricultural Products. *2021 7th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems, ICACCS 2021*, 1096–1100. <https://doi.org/10.1109/ICACCS51430.2021.9441812>
- Malekjani, N., & Jafari, S. M. (2018). Simulation of food drying processes by Computational Fluid Dynamics (CFD); recent advances and approaches. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 78, pp. 206–223). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.06.006>
- McCabe, Smith J. C., & Harriot P. (2007). *Operaciones unitarias* (7^a). McGraw Hill.
- Mohana, Y., Mohanapriya, R., Anukiruthika, T., Yoha, K. S., Moses, J. A., & Anandharamakrishnan, C. (2020). Solar dryers for food applications: Concepts, designs, and recent advances. In *Solar Energy* (Vol. 208, pp. 321–344). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.07.098>
- Mott, R. L. (2004). *Machine Elements in Mechanical Design* (4th ed.).
- Moyano Arévalo, J. R., Naranjo Vargas, E. M., Contreras Vásquez, L. F., & Santillán Mariño, C. J. (2021). Simulation of a natural thermal insulator application in an indirect solar dehydrator. *Ingeniería y Desarrollo*, 38(1), 1–12.

<https://doi.org/10.14482/inde.38.1.620.11>

- Natarajan, S. K., & Elavarasan, E. (2019). A Review on Computational Fluid Dynamics Analysis on Greenhouse Dryer. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 312(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/312/1/012033>
- Nielsen, P. V. (2015). Fifty years of CFD for room air distribution. *Building and Environment*, 91, 78–90. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.035>
- Oberkampf, W. L., & Trucano, T. G. (2002). Verification and validation in computational fluid dynamics. In *Progress in Aerospace Sciences* (Vol. 38).
- Ortiz-Rodríguez, N. M., García-Valladares, O., Pilatowsky-Figueroa, I., & Menchaca-Valdez, A. C. (2020). Solar-LP gas hybrid plant for dehydration of food. *Applied Thermal Engineering*, 177. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115496>
- Ouaabou, R., Nabil, B., Ouhammou, M., Idlimam, A., Lamharrar, A., Ennahli, S., Hanine, H., & Mahrouz, M. (2020). Impact of solar drying process on drying kinetics, and on bioactive profile of Moroccan sweet cherry. *Renewable Energy*, 151, 908–918. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.11.078>
- Poonia, S., Singh, A. K., & Jain, D. (2018). Design development and performance evaluation of photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid solar dryer for drying of ber (*Zizyphus mauritiana*) fruit. *Cogent Engineering*, 5(1), 1–18. <https://doi.org/10.1080/23311916.2018.1507084>
- Salisu, S., Oluwayomi Joel, O., & Murray, A. O. (2019). Design, Construction, and Simulation of a Solar Fish Dryer. *International Journal of Trend in Scientific Research and Development*. www.ijtsrd.com
- Sharma, V. K., Colangelo, A., Spagna, G., & Trisaia, E. C. R. E. (1995). Experimental investigation of different solar dryers suitable for fruit and vegetable drying. *Renewable Energy*, 6(4), 413–424.
- Steinel Professional. (2016). *Information HG2620 E HG 2220 E*. www.steinel.net
- Tagnamas, Z., Bahammou, Y., Kouhila, M., Hilali, S., Idlimam, A., & Lamharrar, A. (2020). Conservation of Moroccan truffle (*Terfezia boudieri*) using solar drying method. *Renewable Energy*, 146, 16–24. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.107>
- UN. (2019). *World Population Prospects 2019 Highlights*.
- Vega-Mercado, H., Marcela, M., Ongora-Nieto, G., & Barbosa-C Anovas, G. V. (2001). *Advances in dehydration of foods*. www.elsevier.com/locate/jfoodeng