



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**DISEÑO CONCEPTUAL DE UN
DESHIDRATADOR SOLAR POR CONVECCIÓN
NATURAL PARA EL SECADO DE FRUTAS EN
EL DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA**

Autor(es)

Oscar Andrés Rodríguez Mercado

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería
Mecánica
Medellín, Colombia
2020



Diseño conceptual de un deshidratador solar por convección natural para
el secado de frutas en el departamento de Antioquia

Oscar Andrés Rodríguez Mercado

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Mecánico

Asesores (a):
Ing. Edwin Lenin Chica Arrieta

Línea de Investigación:
Diseño de sistemas técnicos
Grupo de Investigación:
Grupo de Energía Alternativa

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica.
Medellín, Colombia
2020.

Diseño conceptual de un deshidratador solar por convección natural para el secado de frutas en el departamento de Antioquia

RESUMEN

Según el informe entregado por el Departamento Nacional de Planeación (DNP) en el año 2016, en Colombia se pierden o desperdician alrededor de 9,76 millones de toneladas de comida al año, del cual, el 40,5% lo hacen en la etapa de producción agropecuaria, el 19,8% se pierden en el proceso de poscosecha y almacenamiento y, el 3,5% en los procesos de procesamiento industrial. El departamento de Antioquia hace parte del tercer grupo de departamentos con mayores pérdidas de alimentos en el país, con un total de 1.066.965 toneladas por año, siendo las frutas y vegetales el 58% de ese total. El objetivo planteado para el trabajo consistía en diseñar conceptualmente un deshidratador solar por convección natural para el secado de frutas en el departamento de Antioquia, para lo cual se realiza una revisión exhaustiva de los diferentes modelos de deshidratadores solares diseñados y de los aspectos para tener en cuenta para lograr un dispositivo eficiente y funcional. La búsqueda literaria se segmentó en dos grupos principales: trabajos de diseño conceptual y experimental de secadores solares, y trabajos de aplicaciones de CFD en modelos de secadores solares.

El proceso de diseño se realizó basado en la norma VDI 2221 y enfocado al desarrollo de un diseño conceptual. En la primera etapa de diseño se definieron y clarificaron las tareas, luego se realizó la base del diseño en la etapa del diseño conceptual, seguida por el diseño de materialización y finalmente el diseño de detalle en el cual se realizan los cálculos necesarios para dimensionar el modelo según las necesidades requeridas y deseadas. Como resultado final se obtuvo un deshidratador tipo gabinete que cumplía con los requerimientos básicos establecidos para el diseño y además se adaptaba a los deseados, ofreciendo un ambiente controlado para el deshidratado de frutas, una temperatura de trabajo entre los 30 y 60°C, una capacidad para almacenar 5kg de frutas en forma de rodajas, un sistema 100% solar, bajo costo de fabricación y mantenimiento, entre otras.

Los cálculos realizados, dieron como resultado que el área del colector diseñado para el deshidratador está un 36% por encima del área óptima, teniendo en cuenta que la radiación solar es muy variable y que los cálculos se hicieron en base al valor promedio no se considera modificar las dimensiones para optimizar el área, además también se pudo establecer que la velocidad mínima requerida para el proceso de secado para las dimensiones del deshidratador es de 0,132 m/s y que el potencial de energía solar que necesita el colector es de mínimo 346,392 w, la cual es menor a la que se puede aprovechar de la radiación solar en la ciudad de Medellín, asumiendo una eficiencia del colector del 50%.

INTRODUCCIÓN

Según el informe entregado por el Departamento Nacional de Planeación (DNP) en el año 2016¹, en Colombia se pierden o desperdician alrededor de 9,76 millones de toneladas de comida al año, del cual, el 40,5% lo hacen en la etapa de producción agropecuaria, el 19,8% se pierden en el proceso de poscosecha y almacenamiento y, el 3,5% en los procesos de procesamiento industrial. El departamento de Antioquia hace parte del tercer grupo de departamentos con mayores pérdidas de alimentos en el país, con un total de 1.066.965 toneladas por año, siendo las frutas y vegetales el 58% de ese total.

Si el porcentaje de alimentos desperdiciados o perdidos en la etapa de producción agropecuaria es del 40,5% del total, se puede estimar que en Antioquia se están perdiendo alrededor de 432.121 toneladas al año durante esta etapa. Eguillor Recabarren² indica que algunas de las causas para tales pérdidas en producción, están los daños por plagas y enfermedades, productos no cosechados por no cumplir los estándares del mercado, cosecha incompleta por falta de mano de obra o por sobrecostos en la cosecha, daños mecánicos al producto durante la cosecha, exceso de producción, contaminación, entre otras.

“Para las frutas, por ser alimentos agrícolas perecederos y por los cambios climáticos que se han tenido en los últimos años, ocurren variaciones en niveles de producción, calidad y precios, lo que dificulta acceder a ellas en una forma constante en cualquier época del año; tales dificultades que se solucionan al someter las frutas a procesos de deshidratación, con el propósito de obtener un producto no perecedero”³, puesto que, por medio de la reducción de la humedad, disminuyen la actividad bacteriana para mantener al máximo la calidad nutritiva de los alimentos por largos periodos de tiempo. Jaramillo y Rua⁴ presentan otras alternativas culinarias para la conserva o comercialización de las frutas con mayor índice de desperdicio como lo son el mango, aguacate, carambolo, guayaba, gulupa, piña, sandía, tomate de árbol, uchuva y yacón; entre las propuestas se encuentran productos como las tortas, mermelada, helados, jalea, yogurt, galletas, chips, dulces, entre otros.

El presente trabajo tiene como fin el diseño conceptual de un deshidratador solar por convección natural para el secado de frutas en el departamento de Antioquia. Inicialmente se realizará el estudio del arte para evaluar y posteriormente seleccionar un modelo inicial el cual se dimensionará, y modelará en un software CAD. El comportamiento fluido dinámico al interior del secado se simulará mediante un software de Dinámica de Fluido Computacional (CFD por sus siglas en inglés) según los parámetros teóricos de humedad, temperatura y radiación UV del departamento de Antioquia. Los resultados

¹ Departamento Nacional de Planeación (DNP). 28 de marzo 2016 [Consultado: 03 de marzo de 2020]. Disponible en: <https://www.dnp.gov.co/Paginas/Colombianos-botan-9,76-millones-de-toneladas-de-comida-al-a%C3%B1o.aspx>

² EGUILLOR RECARRENN, Pilar. "Pérdida y desperdicio de alimentos en el sector agrícola: avances y desafíos.". Oficina de estudios y políticas agrarias, 2019.

³ PESCADOR GUEVARA, Diana Marcela, SÁNCHEZ CANO, David Fernando y SEGURO MONTOYA, Juan Camilo. Estudio de prefactibilidad para la producción y comercialización de snacks de frutas deshidratadas y determinación del modelo de negocio. Trabajo presentado como requisito parcial para obtener el título de Magíster en Administración (MBA). Pereira: Universidad EAFIT. Escuela de Administración. 2014. 25 p.

⁴ JARAMILLO, Laura y RÚA, Eddy Y. "Aprovechamiento gastronómico de frutas en sobrecosecha de la plaza minorista José María, Medellín (Colombia)". En: *Revista de Turismo, Patrimonio y Desarrollo: Confederación Panamericana de Escuelas de Hotelería, Gastronomía y Turismo (CONPEHT)*. Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia: 2019, Publicación semestral, nro. 9.

iniciales serán analizados con la intención de hacer las mejoras que requiera el modelo para obtener un diseño conceptual final que cumpla con los requerimientos de diseño planteados.

OBJETIVOS

Objetivo General

Diseñar conceptualmente un deshidratador solar por convección natural para el secado de frutas en el departamento de Antioquia.

Objetivos Específicos

- Estudiar los modelos de deshidratador solar por convección natural existentes en las literaturas.
- Simular y evaluar el diseño inicial de deshidratador con los parámetros teóricos de humedad, temperatura y radiación UV del departamento de Antioquia.
- Analizar los resultados del diseño inicial y realizar un diseño final de deshidratador solar por convección natural que cumpla con los requerimientos de diseño planteado.

MARCO TEÓRICO

⁵La deshidratación es una de las técnicas más utilizada para preservar los alimentos. Esta práctica se emplea desde la antigüedad cuando nuestros antepasados exponían las frutas, granos, vegetales, carnes y pescado al sol para que se secaran, con la intención de tener reservas para los tiempos de escases. ⁶Con la reducción de la humedad, los microorganismos y las enzimas que descomponen estos productos no pueden actuar, ya que estos no se desarrollan en ambientes secos, haciendo que la técnica del deshidratado sea la más efectiva para la preservación de los alimentos.

La deshidratación de alimentos para su conservación consiste en la “reducción del contenido hídrico a niveles inferiores a aquellos favorables al desarrollo de microorganismos y a la disminución de reacciones bioquímicas y enzimáticas”⁷. Este método, comprende dos procesos importantes: la evaporación de la humedad de la superficie, la cual depende de la velocidad del aire que pasa sobre el elemento y de la humedad relativa del ambiente en el que está; la migración de la humedad interna hacia la superficie, que incrementa con el aumento de la temperatura del producto. En el secado de los alimentos, el objetivo es lograr un equilibrio entre estos dos fenómenos para asegurar la calidad del producto final.

Cuando se habla de humedad relativa, se hace referencia a “la relación entre la cantidad real de humedad en el aire a una determinada temperatura y la máxima cantidad que el

⁵ VEGA, Antonio; CHACANA, Marcelo y LENUS, Roberto. La industria de los alimentos deshidratados y la importancia del control del proceso. En: Departamento de Ingeniería en Alimentos: Universidad de La Serena, enero, 2009.

⁶ MAGAÑA, Sara; LÓPEZ, Blanca; PALMA, Ulda y HIDALGO, Héctor. Aprovechamiento de frutas y hortalizas de temporada de la Región de Tabasco, mediante la deshidratación del producto, utilizando una estufa solar. En: Revista de Energías Renovables: Instituto Tecnológico Superior de Villa La Venta, junio, 2019, Vol.3, No.9, P 35-40.

⁷ LANDWEHR, Thomas. La deshidratación de frutas: métodos y posibilidades. 1999.

aire puede contener a esa temperatura”⁸. Considerando a la humedad como la propiedad que describe el contenido de vapor de agua presente en un gas.

Hay dos fenómenos que se deben analizar durante el proceso de secado, es la transferencia de calor y la transferencia de masa. Antes que nada, se define el calor según Cengel: “la forma de la energía que se puede transferir de un sistema a otro como resultado de la diferencia de la temperatura” y esta transmisión se puede dar por conducción, convección y radiación. La ciencia que describe la razón de esa transferencia es la Transferencia de Calor. Análogamente, “La transferencia de masa requiere la presencia de dos regiones con composiciones químicas diferentes y se refiere al movimiento de especies químicas desde una región de alta concentración hacia una de concentración menor. La fuerza impulsora primaria para el flujo de fluidos es la diferencia de presión, en tanto que, para la transferencia de masa, es la diferencia de concentración”⁹. La transferencia de masa se puede presentar en los tres estados principales de la materia; sólido, líquido y gaseoso y, esta solo se transfiere por conducción (también llamada difusión) y convección.

¹⁰Por otro lado, como se mencionó anteriormente, para tener un buen secado del alimento, se necesita aumentar la temperatura de este para que así se logre tener una buena velocidad de migración de la humedad interna hacia la superficie. Todos los materiales no se calientan a la misma velocidad ni consumen la misma energía, es decir, cada sustancia requiere una cantidad de energía en diferente proporción para poder elevar en un grado su temperatura por cada unidad de masa, esta propiedad se llama Calor Específico. Para retirar la mayor cantidad de líquido contenido en los alimentos, la mejor manera es que el líquido cambie de fase líquida a gaseosa, la energía que es absorbida o liberada durante ese proceso se llama calor latente.

¹¹El diseño conceptual del deshidratador no solo se basa en la temperatura de la recámara, sino también, en las corrientes de aire dentro de esta. El flujo será natural, es decir, el movimiento del fluido (que en este caso es aire) se debe a medios naturales, como el efecto de flotación, el cual se manifiesta como la elevación del fluido más caliente (más liviano) y la caída del fluido más frío (más denso). Este fenómeno se da gracias a que la densidad de las sustancias depende mayormente de la temperatura que la presión, ya que, al aumentar la temperatura de la sustancia, la energía interna también aumenta, excitando así las moléculas y causando que se dispersen. Por lo tanto, cuanto mayor sea la diferencia de temperatura entre el aire que entra a la cámara de secado y el que sale, mayor es la fuerza de flotación y como consecuencia, más fuerte son las corrientes de convección natural dentro de esta.

¹²Según el tipo de exposición de los alimentos a la radiación del sol y el método utilizado para la generación del flujo de aire dentro de la cabina de secado, se encuentran varias configuraciones de deshidratadores; están los que someten los alimentos directamente a

⁸ MARTINES, Enrique. Definiciones de humedad y su equivalencia. ENME, 2007, vol. 1, p. 1-5.

⁹ ÇENGEL, Yunus A., GHAJAR, Afshin y DÖRNEVILLE Erika. Transferencia de calor y masa: fundamentos y aplicaciones. En: McGraw-Hill, ed. 4, 2011.

¹⁰ ÇENGEL, Yunus A. y BOLES, Michael A. Termodinámica. En: McGraw-Hill, ed. 7, 2012.

¹¹ CIMBALA, J. M.; ÇENGEL, Yunus A. Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones. 2001.

¹² ROCHE-DELGADO, Liset; HERNÁNDEZ-TOUSET, Juan Pedro; GARCÍA-RODRÍGUEZ, Agustín. Diseño conceptual de secador solar a escala piloto para algas marinas. Tecnología Química, 2017, vol. 37, no 2, p. 184-200.

la radiación del sol y usan un flujo de aire forzado; están los que también son directos pero el flujo de aire es natural; también se encuentran los secadores indirectos que es el aire quien se calienta y por medio de un elemento externo es forzado a pasar por los alimentos los cuales no están expuestos a la radiación solar y; de la misma manera, también se encuentran los indirectos pero de flujo natural.

Existen dos métodos fundamentales para diseñar y analizar sistemas de ingeniería: experimentación y cálculo. Generalmente la experimentación implica la construcción de modelos a escalas para ser probados en condiciones reales. Como el presente trabajo se limita hasta la parte del diseño conceptual, esto indica que la forma de comprobar que tan eficiente y funcional es el diseño, es por medio de cálculos. La dinámica de fluidos computacional (CFD), es un campo de estudio que se dedica a la solución de ecuaciones de flujo de fluidos por medio de computadoras. Consiste en la simulación de eventos considerando parámetros que son controlados cuidadosamente para poder obtener resultados físicamente correctos.

METODOLOGÍA

Revisión de la literatura: Antes de plantear el modelo del deshidratador solar, se realiza una revisión exhaustiva de los diferentes modelos de deshidratadores solares diseñados y de los aspectos para tener en cuenta para lograr un dispositivo eficiente y funcional. La búsqueda literaria se segmentó en dos grupos principales: trabajos de diseño conceptual y experimental de secadores solares, y trabajos de aplicaciones de CFD en modelos de secadores solares. A continuación, se presentan cada uno de estos trabajos.

Trabajos de diseño conceptual y experimental de secadores solares:

Kumar, Sansaniwal y Khatak¹³ en general clasifican a los secadores solares en directos, indirectos e híbridos. Según las corrientes de aire interna, también pueden clasificarse en secadores de convección forzada (o secadores activos) y convección natural (secador solar pasivo). En el trabajo estudian 19 documentos relacionados a los diferentes tipos de secadores solares. El estudio demuestra que los secadores de convección forzada de modo indirecto han demostrado ser superiores en velocidad de secado y calidad de secado; por otro lado, la integración de sistemas de almacenamiento de calor e intercambiadores de calor ayudan a incrementar la eficiencia y el funcionamiento en tiempo de baja insolación.

Devan, Bibin, Asburris, Gokulnath, y Karthick¹⁴ presentan la revisión de diferentes tipos de secadores solares, los cuales clasifican según 3 aspectos fundamentales: modelo de circulación del aire (natural o forzado), según el tipo de secado (directo, indirecto o mixto) y también según la construcción de la sección del secador (tipo túnel, gabinete, etc.). También hacen un prototipo de secador solar directo de convección forzada y tipo túnel, el cual fue puesto a prueba controlando el flujo de aire interno; los resultados demuestran que el tiempo de secado se ve afectado negativamente a altas velocidades, se alcanzaron

¹³ KUMAR, Mahesh, SANSANIWAL, Sunil Kumar & KHATAK, Pankaj. Progress in solar dryers for drying various commodities. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 55, March 2016; pages 346-360. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.158>

¹⁴ DEVAN, P.K. et al. Solar drying of fruits – A comprehensive review. In: Materials Today: Proceedings. Mayo 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.041>

temperaturas entre los 48 °C y 54 °C. La validación del trabajo se realizó comparando los resultados obtenidos en el prototipo con el secado al aire libre de la misma fruta, en la cual la rodaja resultante del secado del prototipo es más seca y crocante que el otro método.

Teixeira -Da y Malpica¹⁵ determinan las dimensiones de una unidad de deshidratación de cacao mediante un modelo analítico transitorio que permite simular el comportamiento de un diseño propuesto hasta alcanzar una curva de secado similar a la curva de secado experimental de un grano de cacao. El diseño general consta de un colector solar plano seguido de un acumulador térmico de granito, una cámara de secado y la chimenea. El modelo analítico logra determinar las medidas óptimas para reducir el tiempo de secado del grano de café hasta 1.000 minutos menor al secado al aire libre (una disminución de aproximadamente 4 días continuos de secado). Debido a que la curva de secado es muy diferente al secado en el patio, se optimiza el diseño con dimensiones que igualen a la curva actual del cacao, con la intención de evitar cambios en las propiedades del grano. Aun así, se logra aumentar el tiempo de aire caliente con el acumulador, obteniendo casi 2,5 horas más y reduciendo el tiempo de deshidratado del cacao en un 25% aproximadamente, con relación al secado del tradicional patio. La temperatura máxima alcanzada fue de 65 °C y una humedad relativa mínima de 10% en el aire secante.

Magaña, López, Palma y Hidalgo¹⁶ construyen un prototipo de secador solar basados en un trabajo realizado anteriormente por Colquitt, Eum, Millis, & Ya (2016). El deshidratador solar es indirecto por convección natural, su geometría es de tipo gabinete, fue puesto a prueba en la región de Tabasco, México. El diseño se evaluó con base a los siguientes parámetros: kilogramos a secar, contenido de humedad inicial y final, temperatura de secado y propiedades del alimento. El prototipo logró temperatura de 60-65 °C en horas pico, se logró retirar un 60% del peso de las frutas, se realizó un análisis microbiológico que reportó la ausencia de hongos y levaduras que pudieran afectar a las frutas; las propiedades de los alimentos se mantuvieron y fueron las adecuadas.

Castañeda, González, Guzmán y Ibarra¹⁷ desarrollan un horno solar para secado de plantas y vegetales, es de tipo indirecto y de convección forzada, controlado por un sistema basado en control difuso. El horno cuenta con un colector solar, una banda transportadora, cámara de secado y un contenedor de aceite que funciona como intercambiador de calor para iniciar el proceso de deshidratación de las plantas. A demás de parámetros como la temperatura, diseño del secador y flujo del aire, también se debe evaluar los atributos nutricionales y la calidad de rehidratación para determinar la calidad del producto final. La temperatura interna del secador fue próxima a los 60 °C, logrando reducir el tiempo de secado de 96 h con el método tradicional a 5,1 h con el horno (desviación estándar de 1,8 h). El porcentaje final de humedad en la flor de Jamaica fue de 10% a 12%.

¹⁵ TEIXEIRA -DA, Juan Manuel y MALPICA, Freddy Alberto. Desarrollo de un modelo matemático para dimensionar un deshidratador solar directo de cacao. En: Ingeniería Mecánica. vol.19, No.1 ene.-abr. 2016. ISSN: 1815-5944

¹⁶ MAGAÑA, Sara, et al. Aprovechamiento de frutas y hortalizas de temporada de la Región de Tabasco, mediante la deshidratación del producto, utilizando una estufa solar. En: Revista de Energías Renovables. Vol. 3, junio 2019; páginas 35-40. DOI: 10.35429/JRE.2019.9.3.35.40

¹⁷ CASTAÑEDA MIRANDA, Alejandro, et al. Desarrollo de un horno solar para el secado de plantas y vegetales usando control difuso. En: Acta Universitaria. Vol. 22, abril-mayo 2012; páginas 14-19. ISSN: 0188-6266

Cortez¹⁸ selecciona un diseño inicial de un trabajo encontrado en internet el cual rediseñó buscando un modelo de bajo costo de inversión y utilización, simple para reproducirse, flexibilidad en la aplicación por diferentes materias primas y alta calidad en los productos finales. El prototipo construido es un secador indirecto por convección natural tipo armario. Se especifica que los factores claves para un buen secado son: aire caliente a una temperatura de 40 a 70 °C, aire con un bajo contenido de humedad y movimiento constante de aire. Por cada 20 °C de aumento de la temperatura del aire, la humedad relativa se reduce a un tercio y su capacidad de retener vapor de agua se triplica. En cuanto a los factores que influyen en el tiempo del secado, se encuentra el tipo de producto, tamaño de los trozos del producto, temperatura del aire, humedad relativa del aire y la velocidad del aire. El experimento se realizó con el objeto de determinar la curva de secado del deshidratador para cada uno de los productos (mango, cebolla, piña y banano) y el comportamiento de la temperatura. El secador logró alcanzar temperatura de hasta 50 °C, con humedad relativa entre 20% y 80%. La curva de deshidratado con el secador solar tuvo la misma tendencia que el secado al aire libre, pero con la diferencia de que no se encontraban expuestos a la lluvia, roedores o insectos, el tiempo de secado fue en promedio de dos días, dependiendo de la insolación.

Calle¹⁹ hace el diseño de un deshidratador solar indirecto por convección natural, equipado con un colector de placas planas, acumulador de calor de rocas negras, paneles solares para alimentar el sistema de sensores que garantizan el ambiente ideal para lograr un buen secado. El tiempo de secado actual reportado al aire libre es de 4 a 5 días de radiación solar efectiva, con el secador diseñado se logra deshidratar el grano de cacao a una humedad final del 7% en un tiempo aproximado de 18 horas de radiación solar efectiva y la temperatura de secado fue de 60 °C. Se utiliza piedra negra como acumulador por su bajo costo y porque es uno de los materiales sólidos con mayor capacidad calorífica comparado con su valor.

Marroquín, Ruiz, Robles y Sevilla²⁰ diseñaron y construyeron un deshidratador solar indirecto para remoción de humedad de rebanadas de mango de 2 mm de espesor, con el objetivo de hacer un prototipo que cuente con un concentrador solar cilíndrico-parabólico para lograr altas temperaturas y un panel solar para la alimentación de un ventilador y los sistemas de control. El resultado de las pruebas arroja que el secador solar alcanzó temperatura máxima de 52 °C, en ese caso no era necesario el ventilador, ya que tenía la función de controlar la temperatura interna del sistema en caso de sobrepasar los 60 °C. El tiempo de secado obtenido fue de 13 horas de sol para el secado de 5 kg de pulpa con temperatura entre los 45 °C y 51 °C y reduciendo la humedad hasta llegar a 17,5%.

¹⁸ CORTEZ CALERO, Carla Patricia. Estudio de un secador solar indirecto por convección natural para el deshidratado de frutas y vegetales en Nicaragua [en línea]. Tesis previa a optar al Título de Máster en Energías Renovables y Medio Ambiente. Nicaragua: Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, León. Facultad de Ciencias y Tecnología. Maestría en energías renovables y medio ambiente 1ra.Ed. 2014. Disponible en: <http://riul.unanleon.edu.ni:8080/jspui/retrieve/7595>

¹⁹ CALLE CRUZ, Saenss. Diseño de un deshidratador solar para optimizar el tiempo de secado de almendras de cacao [en línea]. Tesis para obtener el título profesional de ingeniero mecánico electricista. Perú: Universidad César Vallejo. Facultad de ingeniería. Escuela académico profesional de ingeniería mecánica eléctrica. 2017. Disponible en: <http://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/17268>

²⁰ MARROQUÍN-CANO, Sergio F., et al. Diseño y construcción de un deshidratador solar indirecto de mango ataulfo por convección forzada Revista de Innovación Sistemática Introducción usado para la preservación de alimentos. En: Revista de Innovación Sistemática. Vol. 1, No.2 junio 2017; páginas 9-18.

Papade y Boda²¹ diseñaron y construyeron un secador solar de tipo indirecto por convección forzada. Hicieron un análisis CFD de 2 geometrías diferentes para la conexión entre el colector y la cámara de secado, una es de tipo convergente y la otra es divergente. Para el colector de calor, se define que se pueden utilizar dos tipos de materiales para la acumulación de calor: Calor latente y Calor sensible; en este caso se plantea con dos láminas de metal y una superficie pintada de negro haciendo la función de un acumulador de calor sensible. Como consideración para el diseño, se tiene que la temperatura de secado de alimentos está en el rango de los 30°C a los 65 °C y se decide trabajar por encima de los 45 °C, por otro lado, el espacio de ingreso de aire para el colector se recomienda que sea de 7 cm y, además, se considera que la eficiencia de colector de placas planas debe ser de 30% a 50%. En el análisis CFD la velocidad de entrada de aire se da como 1 m/s y la presión como cero (supuesta). El resultado muestra que la sección convergente, la velocidad aumenta a lo largo del eje y alcanza una velocidad de salida de hasta 2,15 m/s y la presión disminuye; en la sección divergente la velocidad de salida es de 0,333 m/s y la presión aumenta. Con el perfil convergente se logra una reducción del tiempo de secado de casi el 47%.

García, Mejía, Mejía y Valencia²² diseñan y construyen un equipo de deshidratación solar de flujo inducido (convección forzada). El equipo se compone de un sistema de ventilación, colector de placas planas y una cámara de secado. Inicialmente se establece el punto de implementación y sus condiciones de trabajo como el nivel de radiación solar, humedad, entre otras, luego se elige el tipo de dispositivo a utilizar, que en este caso es un deshidratador activo de tipo distribuido, se realiza el dimensionamiento del equipo contando con las condiciones de operación del proceso y la cantidad de materia a procesar, dentro del dimensionamiento se establece un ángulo de inclinación del colector de 15°. Luego de construir el deshidratador, se hace una prueba experimental con uchuva, poniendo a deshidratar la misma cantidad de material en dos dispositivos diferentes (deshidratador solar y deshidratador convencional por resistencia eléctrica) y bajo las mismas condiciones de humedad. Como resultado se obtiene una temperatura máxima de 55 °C y bajo un flujo de aire de 3 m/s, el tiempo de secado en el deshidratador solar fue de 30 horas (4 días de sol entre las 9 am y las 5 pm) y en el convencional 25 horas continuas para llegar a un porcentaje de humedad final de 12%. Por otro lado, se plantean tres modelos matemáticos para describir el proceso de deshidratación, Newton, Page modificado y Henderson Pabis modificado, de los cuales el modelo Page modificado es quien mejor representa el comportamiento del proceso, aunque el deshidratador solar tiene un incremento de 5 horas más de secado que el convencional, este representa un ahorro de energía de 250 kw.h y una reducción de las emisiones de 238,75 kg de CO₂, 2,95 kg de SO₂ y 1,08 kg de NO_x (estimaciones basadas en la producción de energía en plantas termoeléctricas de carbón). La generación de turbulencia en el interior del colector solar incrementa los coeficientes de transferencia de calor por convección y mejora la eficiencia del proceso.

²¹ PAPADE, C. V. & BODA, M. A. Design and development of indirect type solar dryer with energy storing material. In: International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering. Vol. 1, No.12 December 2014; pages 109-114. ISSN 2349-2163

²² GARCÍA, Luis Eduardo, et al. Diseño y construcción de un deshidratador solar de frutos tropicales. En: Avances: Investigación en Ingeniería. Vol. 9, No.2 2012; páginas 09-19.

Rodríguez, López, Cano y Ambriz²³ desarrollan un prototipo de deshidratador solar indirecto por convección forzada e instrumentado con sensores y actuadores. El sistema cuenta con un colector solar, una cámara de secado equipada con difusores y un sistema de movimiento rotacional aplicado a las bandejas, en la salida de aire, tiene un extractor que se activa solo cuando la humedad relativa de la cámara de secado es mayor que la humedad del ambiente también cuenta con un panel solar y un sistema de control que por medio de sensores controla el funcionamiento del motor giratorio de las bandejas y del extractor. Luego de construir el prototipo se hizo un experimento con nopal verdura para obtención de harina. Se logró deshidratar la materia en un tiempo de 21 horas (3 días), operando de 10 am a 5 pm con humedad relativa menor a 20%.

Behera y Das²⁴ diseñaron y fabricaron un deshidratador solar indirecto por convección forzada de tipo gabinete. El diseño consta de un colector solar fabricado en aluminio y aislado térmicamente por medio de fibra de vidrio, la placa acumuladora de calor es una lámina de cobre de 3 mm de espesor. El colector está unido a la cabina de secado y en la salida de la cabina tiene un extractor alimentado por medio de panel solar. El colector se dispuso con una inclinación de 20° con respecto a la horizontal, el secador se diseñó con una capacidad de 20 kg. Luego de construirlo, se hicieron 3 pruebas con 5 kg de mango entre las 9 am y 4 pm. Como resultado, se logró una temperatura máxima de salida de 70 °C, trabajando con temperatura de ambiente máxima de 40 °C, el deshidratado de frutas al aire libre en 56 horas de sol solo lograba retirar el 22% del peso, mientras que, con el nuevo diseño se logró un 50% de reducción del peso en solo 24 horas de sol.

Roche, Hernández y Garcóa²⁵ realizaron el diseño conceptual de un secador solar indirecto tipo gabinete por convección natural. El diseño consta de un colector de placas de cobre y una cámara de secado. Para dimensionar el diseño, se hace el cálculo de la masa a secar, conociendo la cantidad de producto final esperado, se calcula el tiempo total de secado estimado por medio de fórmulas, luego el área de secado y con esto el número de bandejas necesarias. Las dimensiones del colector dependen de la temperatura final esperada, la radiación solar y flujo de aire. Como resultado se tiene que el secado de las algas se da en 5 horas de sol, un área total de secado de 1,16 m² y con esto se calcula que se necesitan 5 bandejas, se determina un área libre para el flujo de aire de 0,11 m² con un espacio entre ellas de 0,005 m para lograr un flujo de aire de secado de 0,34 m³/s. Se aprecia que el colector logra sus menores valores de eficiencia con cielo nublado y a temperatura inferiores a los 22 °C y que se espera lograr una temperatura máxima de 60 °C. La eficiencia de la transferencia de calor del colector del secador varía según las condiciones ambientales y climatológicas desde 23% hasta 73%.

²³ RODRÍGUEZ-SÁNCHEZ, Marco, et al. Desarrollo de un prototipo de deshidratador solar instrumentado sustentable. En: Revista de Prototipos Tecnológicos. Vol.2, No.4 junio 2016; páginas 22-29.

²⁴ BEHERA, Debashree & DAS, Shiv Sankar. Design and fabrication of Forced Convection Cabinet type of solar dryer for drying fruits and vegetables. In: International Journal of Management, Technology and Engineering. May 2019. ISSN: 2249-7455

²⁵ ROCHE, Liset, HERNÁNDEZ, Juan y GARCÍA, Agustín. Diseño conceptual de secador solar a escala piloto para algas marinas. En: Revista Tecnológica Química Universidad de Oriente. Vol. 37, No.2 ago. 2017. ISSN: 2224-6185

Trabajos de aplicaciones de CFD en modelos de secadores solares:

Sanghi, Ambrose, y Maier ²⁶ desarrollaron un modelo computacional de dinámica de fluidos para simular el proceso de secado del maíz en un secador de gabinete solar. La radiación solar incidente se modela utilizando un espectro de doble banda para simular la absorción de radiación de onda corta por el maíz y explicar el efecto invernadero causado por los materiales de acristalamiento. Se estudiaron los perfiles de temperatura, humedad y velocidad del aire. El modelo ayudó a visualizar el flujo de aire dentro del secador solar de convección natural y reveló el estancamiento del aire dentro del secador que limita la capacidad de secado, este fue validado con resultados experimentales y la distribución pronosticada de temperatura y humedad fue similar a las observaciones experimentales, aunque hubo una predicción excesiva tanto de temperatura (8,5%) como de humedad (21,4%). El modelo actual se puede usar para estudiar el efecto de los cambios de diseño en el rendimiento de la secadora. Eliminar el estancamiento y mejorar la convección natural aumentará la tasa de eliminación de humedad y aumentará la eficiencia del secador.

Iranmanesh, Samimi y Barghi²⁷ estudian el rendimiento de un secador solar de gabinete equipado con un colector solar de tubos (ETSC) y un sistema de almacenamiento térmico con aplicación de PCM. Se consideró el análisis térmico del colector solar, la eficiencia del secado, el modelado CFD del sistema y evaluación de la calidad de las rodajas de manzana seca. Se consideraron las ecuaciones de continuidad, Navier-Stokes y Energía para el estudio. En la simulación CFD se trabajó como dos cuerpos, el primero es el sistema de acumulación de calor y como segundo el modelo del secador de gabinete. Alguno de los criterios para la simulación del acumulador, es el uso del modelo basado en presión del programa Fluent, el criterio de convergencia para los residuos escalados se estableció en 10^{-4} para ecuación de continuidad y momento, y 10^{-5} para la ecuación de energía.

La simulación del secador de gabinete se realizó considerando la condición de estado estacionario, el modelo $k-\varepsilon$ viscoso y ecuación de energía, además, los datos se registraron cada 30 min y la velocidad del fluido dentro del sistema era de 0,025, 0,05 y 0,09 kg/s. Las propiedades del aire eran constantes, las iteraciones numéricas para la simulación se estableció alrededor de 1.500 y el valor establecido para la convergencia fue de 10^{-4} .

Amanlou y Zomorodian²⁸ diseñaron, construyeron y evaluaron un nuevo secador de gabinete con el objetivo de investigar el efecto de diferentes geometrías en la cámara de secado del gabinete y el rendimiento del secador, también compararon los diversos diseños CFD y seleccionaron el mejor diseño con respecto a la distribución uniforme de flujo de aire y temperatura en todo el secado. Utilizaron el método numérico de volumen finito de Fluent para la solución de las ecuaciones, realizaron un modelo bidimensional con malla no estructurada por celdas tetraédricas. Eligieron el solucionador de precisión

²⁶ SANGHI, Achint, AMBROSE, RP Kingsly & MAIER, Dirk. CFD simulation of corn drying in a natural convection solar dryer. In: *Drying Technology*. Vol. 18, No.7 2018; pages 859–870. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1359622>

²⁷ IRANMANESH, Masoud, SAMIMI AKHIJAHANI, Hadi & BARGHI JAHROMI, Mohammad Saleh. CFD modeling and evaluation the performance of a solar cabinet dryer equipped with evacuated tube solar collector and thermal storage system. In: *Renewable Energy*. Vol. 145, 2020; pages 1192-1213. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.038>

²⁸ AMANLOU, Y. & ZOMORODIAN, A. Applying CFD for designing a new fruit cabinet dryer. In: *Journal of Food Engineering*. Vol. 101, November 2010; pages 8-15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.06.001>

doble y el método segregado. Simulación de flujo en estado estable dentro de la cámara de secado. El modelo $k-\varepsilon$ mostró resultados muy precisos, comparando los resultados del análisis reveló buenos coeficientes de correlación de 99,9% y 86,5% para la temperatura del aire de secado y la velocidad del aire en la cámara de secado, respectivamente.

Singh, Kumar y Tekasakul²⁹ Hacen una revisión de diferentes programas de computación aplicados en el secado solar, procedimientos de simulación y técnicas de optimización, teniendo en cuenta cuatro tipos de secadores solares: directos, indirectos, mixto y secador solar híbrido. Entre los trabajos estudiados en esta revisión, se encuentra el trabajo realizado por Romero (diseño y fabricación de un secador solar indirecto con capacidad de 50 kg de secado de Vainilla) el cual utiliza Ansys Fluent para simular y validar el diseño. Los resultados del trabajo de Romero muestran que la simulación del sistema colector fue más coherente con los datos experimentales que la simulación del gabinete, esta muestra una pequeña desviación a causa del coeficiente de transferencia de calor que se definió constante. Se recomienda utilizar un coeficiente variable con el tiempo. Por otro lado, documentan el trabajo realizado por Jain, el cual utilizó el programa Matlab 5,3 para resolver el análisis transitorio de un calentador de aire inclinado de placas planas. El programa fue útil para evaluar el rendimiento térmico del calentador de aire solar de placa plana para las aplicaciones de secado de granos. De la revisión concluyen que el programa Ansys Fluent puede ser aplicado para tener la ubicación exacta, predecir la forma y el tamaño exacto del orificio de ventilación, pero presenta la limitación de que el software es un poco difícil de aprender y el mallado es un proceso que conlleva mucho tiempo.

Darabi, Zomorodian, Akbari y Lorestani³⁰ diseñaron un secador solar para frutas por convección forzada y calor inducido. El nuevo modelo presenta una cámara de secado común, pero con diferentes entradas de aire, esto con el fin de lograr un secado homogéneo en todos los alimentos debido a que en un modelo normal el aire va perdiendo su potencial calorífico a medida que va subiendo de niveles dentro de la cámara de secado. La solución numérica se trabajó con base a tres leyes básicas de la física, conservación de la masa, momento y energía, que dan como resultado la ecuación de continuidad, Navier-Stokes y ecuación de energía respectivamente. El número Reynolds se calculó en varios puntos a la entrada y en todos los casos dio mayor a 2.000, lo que representa un flujo turbulento. La simulación CFD se realizó en el programa Fluent de Ansys, se utilizó un solucionador de doble precisión y método segregado, se simuló el fluido en condición de estado estable, el modelo de turbulencia utilizado fue el $k - \varepsilon$. Como condiciones de frontera se tienen a la entrada 3 velocidades de aire (1, 2 y 3 m/s) con dirección normal a la entrada; en la salida se asume una presión de salida igual a cero; se definieron los parámetros empíricos de la ecuación de caída de presión y la porosidad del lecho de fruta y la malla de aluminio; se definieron los coeficientes de transferencia de calor de las paredes de la cámara y las condiciones ambientales. Se asumió que la conductividad térmica, el calor específico y la densidad de la pared de la cámara eran: 0,16 w/(m.K), 1.255 J/(kg.K) y 720 kg/m³ respectivamente. La temperatura ambiente y humedad relativa fue de 15°C y 30% respectivamente en todos los casos.

²⁹ SINGH CHAUHAN, Prashant, KUMAR, Anil & TEKASAKUL, Perapong. Applications of software in solar drying systems: A review. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 51, November 2015; pages 1326-1337. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.025>

³⁰ DARABI, H., et al. Design a cabinet dryer with two geometric configurations using CFD. In: Journal of Food Science and Technology. Vol. 52, April 2013; pages 359–366. DOI: 10.1007/s13197-013-0983-1

Para la verificación de los resultados del análisis CFD, se procedió a fabricar la geometría obtenida en el trabajo realizado por Amanlou and Zomorodian (2010) y se evaluaron en diferentes condiciones de operación, el calor fue generado por medio de una resistencia eléctrica ubicada en la entrada de aire. El resultado muestra que el modelo $k-\varepsilon$ entregó datos muy precisos, los resultados del análisis CFD con los experimentales tuvieron un alto grado de correlación (0,99) en cuanto a la velocidad del aire. El nuevo diseño superó en muchos aspectos al modelo realizado por Amanlou and Zomorodian.

Yanniotis y Stoforos³¹ hacen una revisión de la literatura disponible de la aplicación del análisis CDF en la ingeniería de alimentos. Muestra cómo herramientas como la dinámica de fluido computacional puede ayudar en la optimización de procesos como horneado, esterilización y secado de alimentos. Confirman la gran utilidad de la herramienta CFD en el mejoramiento de la calidad de los productos, la optimización del proceso de secado y reducción de los costos energéticos en los procesos. También se puede utilizar para la resolución de problemas y la optimización de las condiciones de procesamiento, incluida la evaluación de los efectos del diseño y los parámetros operativos en el proceso, aun así, se considera que el análisis computacional ayuda mucho en el diseño, pero no reemplaza completamente las pruebas piloto y los métodos experimentales.

Patel y Patel³² realizan el análisis CFD de un deshidratador solar por convección forzada para obtener la causa de la reducción de la eficiencia. El modelo consta de una cabina de secado, un ventilador, una unidad calentadora de aire, ducto de secado y de descargue. En el proceso de simulación se considera solo la mitad de la geometría ya que era simétrica. Como resultado del análisis, se obtiene que la geometría a la entrada causaba caídas de presión y, además, la distribución de las bandejas reducía la velocidad del aire de entrada. Los resultados se validaron con una prueba piloto construida y puesta en marcha. Con las correcciones físicas, se logró un aumento de eficiencia de un 3%.

Malekjani y Jafari³³ hacen una revisión de la importancia fundamental, méritos y deficiencias de CFD en el modelado de procesos con especial enfoque en la deshidratación de productos alimenticios. En el estudio determinan que los principales parámetros externos que afectan la transferencia de calor y masa son el aire ambiente o velocidad del fluido de secado, temperatura y humedad relativa; mientras que densidad, porosidad, permeabilidad, calor específico, difusividad de la masa y conductividad térmica son algunos de los parámetros que afectan el proceso de secado. Por otro lado, en general, los modelos de turbulencia se categorizan en dos grupos según las ecuaciones que los gobiernan: 1. Reynolds averaged Navier-Stokes (RANS); y 2. los modelos que trabajan en fluctuaciones informática (LES). Realizaron un cuadro comparativo de los diferentes modelo, presentando las ventajas y las desventajas de cada uno, así mismo, presentan un esquema principal del análisis CFD donde dividen el proceso en tres fases: pre-procesamiento (planteamiento del problema, generación de la malla, selección del modelo computacional), procesamiento (discretización de las ecuaciones matemáticas,

³¹ YANNIOTIS, Stavros & STOFOROS, N. G. Modelling food processing operations with computational fluid dynamics: A review. In: Scientia Agriculturae Bohemica. Vol. 45, 2014; pages 1-10. DOI: 10.7160/sab.2014.450101

³² PATEL, Atul & PATEL, Gaurav. Operational augmentation of forced circulation type solar dryer system using CFD analysis. In: Int. Journal of Engineering Research and Applications. Vol. 4, April 2014; pages 265-268. ISSN: 2248-9622

³³ MALEKJANI, Narjes & JAFARI, Seid Mahdi. Simulation of food drying processes by computational fluid dynamics (CFD); recent advances and approaches. In: Trends in Food Science and Technology. Vol. 78, August 2018; pages 206-223. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.06.006>

aplicación de las condiciones de frontera, iteración continua hasta alcanzar la convergencia) y pos-procesamiento (análisis numérico de los resultados y visualización de los resultados). Por otro lado, presentan la clasificación de los secadores según Mujmdar (2008), el cual los agrupa en 4 categorías: estrategia de secado, medio de transferencia de calor, método de manejo de sólido y modo de ingreso del calor. En cuanto a las aplicaciones de CFD en sistema de secado convectivo, se encuentran los secadores solares los cuales son clasificados en 4: directos, indirectos, mixtos e híbridos. CFD puede ser utilizado para predecir la distribución de los perfiles de la velocidad y la temperatura en estos secadores. En conclusión, dado que un material alimenticio es un objeto biológico, la utilización del modelado computacional y la simulación en Ciencia y Tecnología de los Alimentos no puede tener éxito sin el uso adecuado de experimentos físicos que determinan las características biológicas y fisicoquímicas de los materiales alimenticios.

Diseño del deshidratador solar:

En este proceso, inicialmente se analizarán las metodologías planteadas en la literatura para el diseño de máquinas y elementos mecánicos, haciendo énfasis en lo conceptual, debido a que este trabajo tiene como objetivo principal el diseño conceptual de un deshidratador solar. Luego se procede a seleccionar uno de estos métodos para posteriormente desarrollar el diseño del sistema secador.

Blanco (2015)³⁴ realiza en su trabajo la revisión de las diferentes metodologías de diseño disponible en la literatura, en el especifica dos grupos principales: *metodologías descriptivas* (describen la secuencia de actividades que típicamente ocurren en un diseño) y *metodologías prescriptivas* (hace referencia al ¿cómo hacerlo? y recomienda un patrón de actividades durante el proceso de diseño). Dentro de estas últimas metodologías se diferencian dos tipos: *modelo de fase* (la estructura del diseño está compuesta por etapas con una secuencia recomendada para su ejecución) y *modelo de artefacto* (se centra básicamente en cómo evolucionar la información hasta obtener el diseño final).

Metodologías descriptivas: Estos métodos son basados en la observación del desempeño de los diseñadores, es un proceso más intuitivo. Según Cabarrocas (1999)³⁵, la experiencia ha demostrado que el desarrollo de sistemas siguiendo un método intuitivo o natural, conlleva en muchas ocasiones a cometer omisiones en el diseño o contar con alternativas de solución poco óptimas para las funciones especificadas, las cuales pueden haberse previsto siguiendo una metodología más estructurada y ordenada. En este grupo entran las metodologías propuestas por French (1997), Cross (2000) y Roozenburg & Eekels (1995).

³⁴ BLANCO ROMERO, María Elena. Metodología para el diseño de máquinas adaptadas a comunidades en desarrollo [en línea]. Plan de investigación para doctorado en sostenibilidad. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya. Programa de Doctorado en Sostenibilidad. 2015.

³⁵ CABARROCAS, Joan. Disseny Conceptual basat en la síntesi funcional de sistemes d'accionament amb múltiples modes d'operació. Tesis en opción al grado científico de Doctor Ingeniero Industrial. Catalunya: Universitat Politècnica de Catalunya. 1999.

Metodologías prescriptivas: Alvares (2016)³⁶ las describe como modelos que tratan de guiar a los diseñadores en las formas de realizar el proceso de diseño, ofreciendo un procedimiento algorítmico y sistemático a seguir. Algunos de los trabajos que entran en este grupo, según la subclasificación son:

- **Modelo de fase:** En este se encuentran las propuestas de Pahl et al. (1996), Pugh (1991), Ullman (1992) o la norma alemana VDI 2222 (1977) y la más reciente VDI 2221 (1986, en inglés), Ulrich y Eppinger (2000) o Otto y Wood (2001) aunque estos dos últimos son modelos de fase orientados a desarrollo de productos.
- **Modelo de artefacto:** La técnica del desarrollo de la función de calidad (o QFD por sus siglas en inglés) de Akao (1990) y el modelo de diseño axiomático de Suh (1990, 2001), aunque este último modelo se aleja de los modelos desarrollados hasta el momento y se trata de métodos complejos que su uso a nivel práctico es bastante limitado (Ferrer Real, 2007)³⁷.

Teniendo en cuenta el trabajo que se va a desarrollar, las metodologías prescriptivas enfocadas en el modelo de fases son la mejor opción para desarrollar el diseño conceptual de una máquina o elemento mecánico. Aun así, se tiene una variedad de propuestas para realizar dicho proceso y para analizar las fases de cada una de ellas, se tomó como referencia el cuadro comparativo presentado en la *tabla 1*.

En este cuadro se evidencia las etapas básicas que expone Riba (2002)³⁸ y a las cuales se acoplan gran parte de los modelos, así mismo, también se presentan los resultados esperados en cada una de estas etapas. Por otro lado, para la selección de la metodología a utilizar en este trabajo, se evidencia que la norma alemana VDI 2221 (1986) cumple con las etapas básicas del diseño y los entregables en cada una de ellas son congruentes con los objetivos específicos del presente estudio, así como su resultado final con el objetivo principal. En la *ilustración 1* se presenta el esquema general de la norma alemana VDI 2221.

³⁶ ALVAREZ CABRALES, Alexis. Método para el diseño conceptual mecánico basado en la trazabilidad de los requerimientos funcionales. Resumen de tesis presentada en opción al grado científico de doctor en ciencias técnicas agropecuarias. Mayabeque: Universidad Agraria de La Habana “Fructuoso Rodríguez Pérez”. Facultad de Ciencias Técnicas. Centro de Mecanización Agropecuaria. 2016. 8 p.

³⁷ FERRER REAL, Inés. Contribución metodológica en técnicas de diseñar para fabricación. Tesis doctoral. Girona: Universitat de Girona. Projectos de Innovación Tecnológica en la Ingeniería de Producto y Procesos. Departamento de Ingeniería Mecánica y de la Construcción Industrial. 2007.

³⁸ RIBA ROMEVA, Carles. Diseño concurrente [en línea]. Responsabilidad subordinada. Catalunya: Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, SL, 2002. 226. Disponible en <http://hdl.handle.net/2099.3/36754>

Etapas básicas (Riba, 2002)	Pahl et al. (2007)	Pugh (1990)	Ullman (2010)	VDI 2221 (1986)	Resultados
	Planificación	Mercado	Establecimiento de la necesidad Planificación		
ETAPA 1 DEFINICIÓN	Clarificación de la tarea	Especificación	Desarrollo de especificaciones	Definición y clarificación de la tarea	Especificación
ETAPA 2 DISEÑO CONCEPTUAL	Diseño conceptual	Diseño del concepto	Diseño conceptual	Diseño conceptual Diseño de forma	Principios de solución, arquitectura de máquina (estructura funcional, estructura modular)
ETAPA 3 DISEÑO DE MATERIALIZACIÓN	Diseño de materialización	Diseño detallado	Desarrollo del producto	Diseño de forma	Planos de conjunto, prototipos
ETAPA 4 DISEÑO DE DETALLE	Diseño de detalle			Diseño detallado	Planos de pieza, documentos de fabricación (pre-series, series)
		Fabricación	Producción Servicio Retirada		
		Ventas			

Tabla 1: Etapas de diferentes métodos para el diseño de máquinas
Fuente: BLANCO, María, 2015.

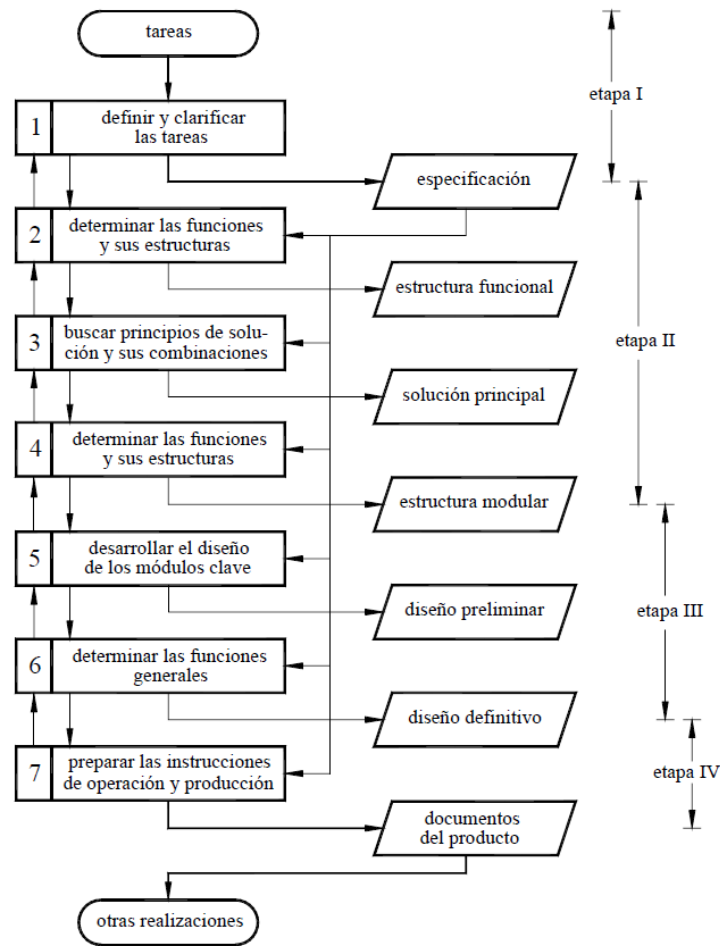


Ilustración 1: Etapas del proceso de diseño según la norma alemana VDI 2221.
Fuente: Riba, 2002

Conforme a las etapas de dicha norma, a continuación, se presenta el proceso de diseño del deshidratador solar.

Etapas 1: Definición y clarificación de la tarea. Inicialmente se establecen las especificaciones o funciones requeridas y deseadas para el diseño. La *tabla 2* corresponde al listado de las especificaciones y sus determinaciones, y en la *tabla 3*, se encuentran cada una de estas especificaciones con la descripción y si son fundamentales para el funcionamiento de la máquina o son características deseadas.

La tabla de especificaciones para el diseño se hizo en base a la lista de referencia de especificaciones realizada por Riba (2002)³⁹ y se añadieron algunos conceptos no contemplados en ese trabajo.

Lista de referencia de especificaciones	
Conceptos	Determinaciones
Función	Descripción de las funciones principales, ocasionales y accidentales del producto (si es necesario, con esquemas)
Dimensiones	Espacios, volúmenes, masas, longitudes, anchuras, alturas, diámetros; número y disposición de elementos
Energía	Accionamientos mecánicos y otros conversores de energía: alimentación y control; transmisiones; potencia y rendimiento
Materiales	Flujo, transporte y transformación de materiales; limitaciones o preferencias sobre su uso; costos y disponibilidad en el mercado
Fabricación y montaje	Limitaciones o preferencias en procesos y equipamiento; variantes en el producto y flexibilidad en la fabricación.
Transporte y distribución	Embalaje y transporte: dimensiones, masas, orientación, golpes; instalación, montaje y puesta a punto
Vida útil y mantenimiento	Vida prevista; fiabilidad y mantenibilidad; tipo de mantenimiento e intervalos de servicio; criterios sobre recambios
Impacto ambiental	Consumos de energía y materiales; limitaciones al impacto ambiental en la fabricación, utilización y fin de vida
Economía	Costo de los materiales, fabricación, transporte e instalación; costo de mantenimiento y cambio de piezas

Tabla 2: Listado de especificaciones de diseño.

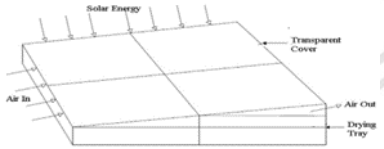
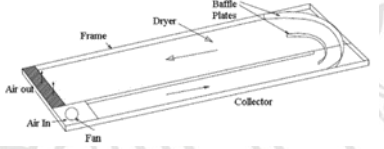
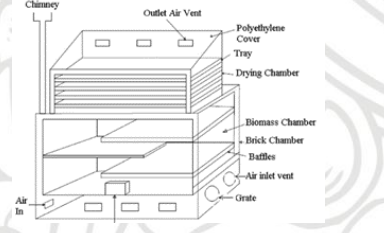
Fuente: Elaboración propia

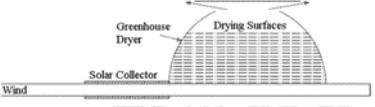
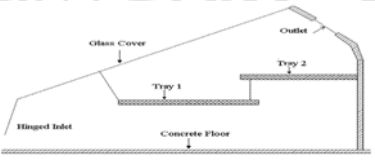
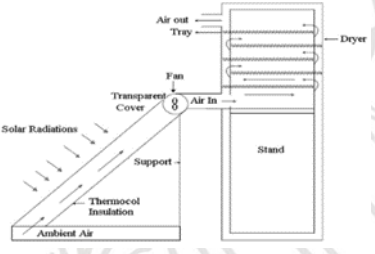
³⁹ RIBA ROMEVA, Carles. Diseño concurrente [en línea]. Responsabilidad subordinada. Catalunya: Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, SL, 2002. p 86. Disponible en <http://hdl.handle.net/2099.3/36754>

ESPECIFICACIONES INICIALES		
CONCEPTO	R/D	DESCRIPCIÓN
Función	R	Reproducir en ambiente controlado el proceso de secado de rodajas de frutas bajo las condiciones críticas de radiación y humedad del departamento de Antioquia
	D	Deshidratar las rodajas de frutas a una temperatura de trabajo entre los 30 y 60°C y con un aire con humedad absoluta menor a 25%.
Dimensiones	D	Contar con una capacidad para deshidratar 5kg de frutas en simultaneo
Energía	R	Debe ser un sistema independiente, solo usa como fuente de energía la emitida por el sol; no usa componentes eléctricos.
Materiales	R	Materiales de fácil disponibilidad, livianos, resistente a la intemperie.
Fabricación y montaje	R	Fabricación sencilla, fácil instalación.
Transporte y distribución	D	Diseño modular, facilidad para transportar y portabilidad.
Vida útil y mantenimiento	D	Poco mantenimiento, limpieza eventual y vida útil mayor a 5 años.
Impacto ambiental	D	Producir el menor impacto ambiental durante su fabricación, instalación y uso.
Economía	D	Producción de bajo costo, mantenimiento económico y fácil. Piezas nacionales y económicas.
R: Requerido; D: Deseado		

Tabla 3: Especificaciones para el diseño.
Fuente: Elaboración propia.

Etapas 2: Diseño conceptual. Basados en la revisión de la literatura, se puede confirmar que, de manera general los deshidratadores solares se clasifican en dos tipos, directos e indirectos según la disposición de los alimentos al sol. Así mismo, otro factor de clasificación es el flujo de aire interno, si es forzado o si se da por convección natural. Por otro lado, algunas de las geometrías y tipos de secadores, se presentan en la *tabla 4*.

TIPO DE SECADOR SOLAR	CARACTERISTICAS	VENTAJAS	DESVENTAJAS	ESQUEMA
Secador solar directo	<ul style="list-style-type: none"> • La humedad del producto a secar es quitada por el impacto directo de la radiación solar en el producto con o sin circulación de aire natural. • Un secador directo tiene una cámara de secado que es una caja aislada cubierta por un elemento transparente ya sea de vidrio o plástico. • Tiene orificios de ingreso y salida de aire. • Cuando la radiación solar incide en la cubierta de vidrio, el aire se calienta y circula de forma natural o por la presión del viento utilizando una fuente externa o una combinación de ambos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Su construcción es simple y económica. • Protege a los alimentos del polvo, la lluvia, escombros, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • El sobrecalentamiento del producto. • La calidad del producto indeseable. • La capacidad de secado limitada. No es portable 	
Secador solar de túnel de aire forzado	<ul style="list-style-type: none"> • Compuesto por un calentador de aire solar y un secador de túnel para secar diversos productos agrícolas. • El secador es tipo mixto (directo-indirecto) porque cuenta con un colector solar, pero la cabina de secado también está expuesta a los rayos solares. 	<ul style="list-style-type: none"> • Comparado con el secado convencional, el tiempo de secado es mucho menor. • La unidad colectora solar ayuda a obtener valores de temperatura muy altos. • El ventilador permite controlar el flujo de aire interno evitando sobresaturación del aire y exceso de temperatura. 	<ul style="list-style-type: none"> • La calidad del producto indeseable. • La capacidad de secado limitada. • El sistema de secado solar de cierta forma depende de la disponibilidad de electricidad y sus requisitos. • No es portable. 	
Secador solar híbrido	<ul style="list-style-type: none"> • Consiste en la combinación de un secador solar de convección natural directo con un quemador de biomasa simple. 	<ul style="list-style-type: none"> • No depende completamente de la radiación solar. • Puede trabajar las 24 horas del día continuo, reduciendo el tiempo de secado total. 	<ul style="list-style-type: none"> • Producción de gases de combustión. • Su construcción es más compleja y costosa. • No es portable 	

<p>Secador de invernadero</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Cuenta con un colector cilindrico y una cabina de secado tipo invernadero. • El secado es mixto (directo indirecto) 	<ul style="list-style-type: none"> • Se logra temperatura de secado 10°C por encima de la temperatura ambiente. • Tiene capacidad de almacenar en la cabina de secado volúmenes considerados de materia a secar. 	<ul style="list-style-type: none"> • El sobrecalentamiento del producto. • La calidad del producto indeseable. • La capacidad de secado limitada. • Construcción medianamente costosa y compleja. • No es portable 	
<p>Secador solar directo de aire forzado</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Consiste en una cabina de secado con la superficie superior transparente, superficies internas de color negro, ranura de entrada de aire, salida de aire y un elemento eléctrico que controla el flujo de aire al interior del sistema. 	<ul style="list-style-type: none"> • Construcción sencilla. • El ventilador permite controlar el flujo de aire interno evitando sobresaturación del aire y exceso de temperatura. • Buen volumen de almacenamiento para secado 	<ul style="list-style-type: none"> • El ventilador necesita alimentación para su funcionamiento, al igual que todo el sistema electrónico. • La calidad del producto indeseable o maltratada por la radiación. • No es portable y la inversión del ventilador aumenta los costos. 	
<p>Secador solar indirecto de convección forzada</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Tienen un colector solar a parte de la unidad de secado. • La unidad de secado es de tipo gabinete por su geometría simple. • Generalmente se componen de colector solar, unidad de secado, un ventilador y conducto para la circulación de aire. • Los alimentos no están expuestos a los rayos solares. 	<ul style="list-style-type: none"> • Los alimentos no son maltratados por la insolaciónLa unidad colectora solar ayuda a obtener valores de temperatura muy altos. • El ventilador permite controlar el flujo de aire interno evitando sobresaturación del aire y exceso de temperatura. 	<ul style="list-style-type: none"> • El ventilador necesita alimentación para su funcionamiento, al igual que todo el sistema electrónico. • Esta alimentación se puede lograr por medio de panel solar o conexión a red eléctrica, lo cual incrementa los costos del equipo. • La implementación del sistema de ventilación conlleva a trabajo de programación, una inversión alta para lograr un sistema robusto para soportar el trabajo a la intemperie. 	

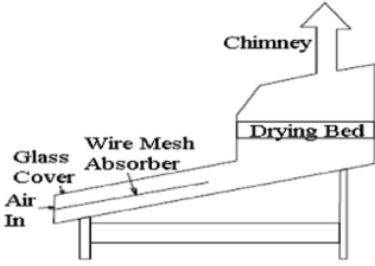
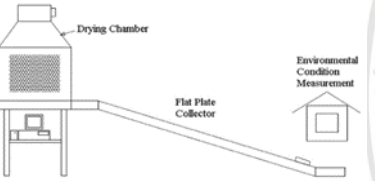
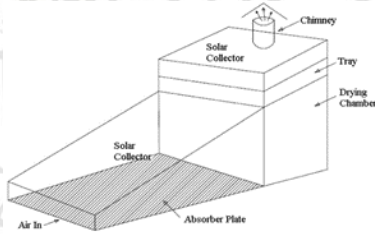
<p>Secador solar indirecto con sistema de almacenamiento.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Tienen un colector solar a parte de la unidad de secado. • El colector solar tiene geometría de placa planas. • La unidad de secado es de tipo gabinete por su geometría simple. • Los alimentos no están expuestos a los rayos solares. • Cuenta con un material con propiedades térmicas que le permiten acumular calor durante el tiempo de alta insolación y luego liberarlo. Puede ser forzado o natural. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor tiempo de calor efectivo de secado • Los alimentos no son maltratados por la insolación • La unidad colectora solar ayuda a obtener valores de temperatura muy altos • En caso de ser forzada, el ventilador permite controlar el flujo de aire interno evitando sobresaturación del aire y exceso de temperatura. • Liviano y portable 	<ul style="list-style-type: none"> • Al inicio el proceso de secado, según la configuración y tipo de material acumulador de calor, puede ralentizar el incremento de temperatura mientras que incrementa la temperatura del acumulador. • En caso de ser de convección forzada, sistema de ventilación conlleva a trabajo de programación, una inversión alta para lograr un sistema robusto para soportar el trabajo a la intemperie. 	
<p>Secador solar indirecto asistido por energía solar</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Cuenta con un ventilador, un sistema auxiliar de calor, un colector solar, cambia de secado, sensórica para el control de las condiciones internas del secador y un sistema de medición de condiciones ambientales. • El colector solar tiene geometría de placa planas. • La unidad de secado es de tipo gabinete por su geometría simple. • Fuente de alimentación solar. • Los alimentos no están expuestos a los rayos solares. 	<ul style="list-style-type: none"> • Los alimentos son secados en un ambiente completamente controlado. • El tiempo de secado se reduce por la alimentación auxiliar de aire caliente. • Los alimentos no son maltratados por la insolación. • El ventilador permite controlar el flujo de aire interno evitando sobresaturación del aire y exceso de temperatura. 	<ul style="list-style-type: none"> • Construcción compleja y costosa. • No es portable. 	
<p>Secador solar de convección natural de modo mixto</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Tienen un colector solar a parte de la unidad de secado. • La unidad de secado es de tipo gabinete por su geometría simple. • Los alimentos están expuesto a los rayos solares. • El flujo de aire es natural. 	<ul style="list-style-type: none"> • La unidad colectora solar ayuda a obtener valores de temperatura muy altos. • Fácil construcción y de bajo costo. • No necesita sistema de alimentación eléctrico. • Liviano y portable 	<ul style="list-style-type: none"> • Los alimentos expuestos al sol. • Malos cálculos en la geometría de salida de aire pueden causar retención de aire y baja eficiencia. • Depende completamente de la radiación solar. 	

Tabla 4: Resumen de algunos tipos de secadores solares, sus ventajas y desventajas.

Fuente: KUMAR, Mahesh, SANSANIWAL, Sunil Kumar & KHATAK, Pankaj. Progress in solar dryers for drying various commodities. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 55, March 2016; pages 346-360. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.158>

Luego de estudiar algunos de los deshidratadores solares que se han diseñado y están disponible en la literatura, se hace la selección del tipo de deshidratador a trabajar con base en las especificaciones iniciales de diseño.

Entre los posibles tipos de deshidratador a trabajar seleccionados por su bajo costo y facilidad de fabricación, se encuentran, *secador solar de convección natural de modo mixto*, y *secador solar indirecto con sistema de almacenamiento*. Buscando la flexibilidad y variedad de secado de diferentes alimentos, se hace énfasis en secadores tipo indirecto, evitando que los frutos estén sometidos a la radiación solar para que sus propiedades finales no se vean afectadas. Así mismo, para asegurar altas temperaturas y buen flujo de aire, el secador debe tener sistema colector y con el fin de tener mejor tiempo de secado y ampliando el tiempo de calor efectivo, se tiene mayor preferencia por el secador solar indirecto con sistema de almacenamiento. Seleccionando el tipo de deshidratador, se procede a determinar las funciones y su estructura.

- **Determinación de las funciones y su estructura funcional.**

La función global del sistema se puede representar de la siguiente manera:

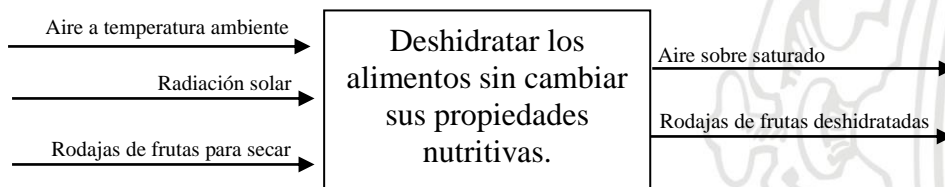


Ilustración 2: Diagrama de función global del sistema.
Fuente: Elaboración propia

En la *ilustración 2* se presenta de manera general que el sistema requiere tres fuentes de alimentación para poder operar, una de ellas es la materia prima para deshidratar, estas son rodajas de frutas con una humedad inicial la cual depende de las propiedades del alimento; para poder retirar la humedad contenida en el material, se requiere de aire a temperatura ambiente, el cual se calienta por medio de la tercera fuente de energía, radiación solar. Con la integración de estos tres elementos, se realiza el proceso de secado de estos alimentos y se tiene como resultado un producto de calidad y con baja cantidad de humedad, además, también se tiene a la salida un flujo de aire caliente con alto contenido de humedad.

- **Principios de solución y sus combinaciones.**

A partir del análisis de la estructura funcional y de los requisitos funcionales del diseño, se establecen los principios de solución siguiente:

- A) El primero consiste en implementar un calentador de aire solar acoplado a una cámara de secado que permita una buena distribución del aire caliente que circula

dentro de esta y en la salida, establecer la geometría adecuada que ayude a impulsar la salida de aire.

- B) Y, el segundo, consiste en diseñar un colector solar con un acumulador de calor integrado y que se acople a una cámara de secado que permita una buena distribución del aire caliente que circula dentro de esta y en la salida, establecer la geometría adecuada que ayude a impulsar la salida de aire.

- **Determinar las funciones y sus estructuras modulares.**

Esta parte de la etapa 2 consiste en la representación en diagrama de bloques de las funciones que debe realizar el producto (independientemente de las soluciones que se adopten) y donde las líneas de conexión representan el flujo de la energía, materiales y señales entre la entrada y la salida de las funciones. Como se muestra en la *ilustración 3*.



Ilustración 3: Diagrama de bloques de deshidratador solar.
Fuente: Elaboración propia

El de la *ilustración 3* indica que el proceso inicia con el cumplimiento de la función del colector solar, al cual ingresa aire a temperatura ambiente, es calentado dentro de este sistema, para que, por medio del empuje generado por la diferencia de temperatura, el aire atraviese y llegue a la cabina de secado con una temperatura mucho mayor a la temperatura del ambiente, luego este aire caliente circula dentro de la cabina de secado retirando la humedad de los producto y salga por el escape del secador.

Etapa 3: Diseño de materialización.

- **Desarrollo de los módulos claves.**

Teniendo claro la estructura general del diseño, se procede a plantear alternativas de solución que cumplan con las funciones anteriormente ilustradas.

A continuación, en la *tabla 5* se presenta la matriz morfológica; la cual consiste en una cuadrícula en la que la primera columna corresponde a las funciones necesarias por

cumplir, y en la parte derecha de la cuadrícula se encuentran las alternativas de solución planteadas.

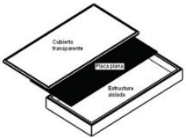
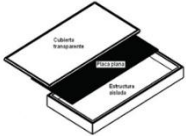
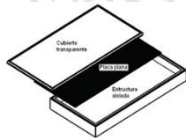








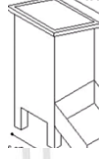



Alternativa Función		Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Sistema Colector solar	Tipo de colector solar			
	Material absorbedor			
	Material del sistema colector			
Cabina de secado	Geometría			
Salida de aire	Geometría de salida			

Tabla 5: Matriz Morfológica
Fuente: Elaboración propia.

La primera alternativa de diseño corresponde a un deshidratador solar indirecto de convección natural conformado por un colector solar que cuenta con un sistema acumulador de energía calorífica en forma de intercambiador de calor equipado con agua como sustancia almacenadora de calor, ya que ésta cuenta con una capacidad calorífica de 1.000 (kcal/m³.°C), el material del colector es de madera prensada; en cuanto a la cabina de secado, es de tipo gabinete y completamente en madera con una ranura en la parte superior para la salida de aire. La segunda alternativa, cuenta con un colector solar tipo placa plana, que en su mitad tiene una placa de piedra negra como elemento acumulador de calor, esta piedra cuenta con una capacidad calorífica de 574 (Kcal/m³.°C), a diferencia de la primera alternativa, el aire pasa por ambas caras de la placa acumuladora, obteniendo mayor área de contacto para calentar el aire; la cabina de secado tiene las mismas especificaciones de la primera alternativa y la salida de aire también es una ranura. Por último, la tercera alternativa es igual a la segunda alternativa, pero la salida del aire cuenta con una chimenea.

- **Determinación de las funciones generales.**

En este punto, se procede a evaluar las alternativas basados en un conjunto de criterios evaluativos que surgen de las funciones generales del diseño. En la *tabla 6* se presentan los criterios de selección en la segunda columna, el peso que tiene cada uno de esos criterios para la toma de la decisión en la tercera columna y en las columnas siguientes, las alternativas, el peso establecido a cada una de ellas y el valor final.

No.	CRITERIO	PESO	CONCEPTO					
			Alternativa 1		Alternativa 2		Alternativa 3	
			Mag	Valor	Mag	Valor	Mag	Valor
1	Facilidad de fabricación	20%	0,5	0,10	1	0,20	0,75	0,15
2	Facilidad de operación	20%	1	0,20	1	0,20	1	0,20
3	Costo de fabricación y mantenimiento	30%	0,5	0,15	1	0,30	0,6	0,18
4	Ciclo de vida	20%	0,75	0,15	1	0,20	1	0,20
5	Facilidad de transporte	10%	0,5	0,05	1	0,10	1	0,10
TOTAL PESO		100%	0,65		1		0,83	

Tabla 6: Selección de alternativa de solución
Fuente: Elaboración propia

La magnitud, es un valor que varía entre 0 y 1 y que representa que tanto se cumple el criterio evaluativo en dicha alternativa. Este valor se multiplica por el porcentaje del peso y da como resultado el valor resultante de la evaluación. Según esto, la alternativa 2 es la que tiene el mayor valor de peso y por ende es la seleccionada para continuar el proceso de diseño. En caso de no obtener los resultados deseados con esta alternativa, se recurre a un proceso iterativo con fin de encontrar la solución óptima para el diseño.

En la *ilustración 4* se muestra el esquema general del deshidratador solar y sus componentes esenciales. Con este modelo base se inicia el proceso de cálculo de dimensiones de cada una de las partes, radiación solar, el planteamiento de las ecuaciones básicas que rigen el diseño de la cabina de secado y el colector solar, y el análisis de dinámica de fluido computacional para evaluar el comportamiento de los vectores velocidad y temperatura dentro del sistema.

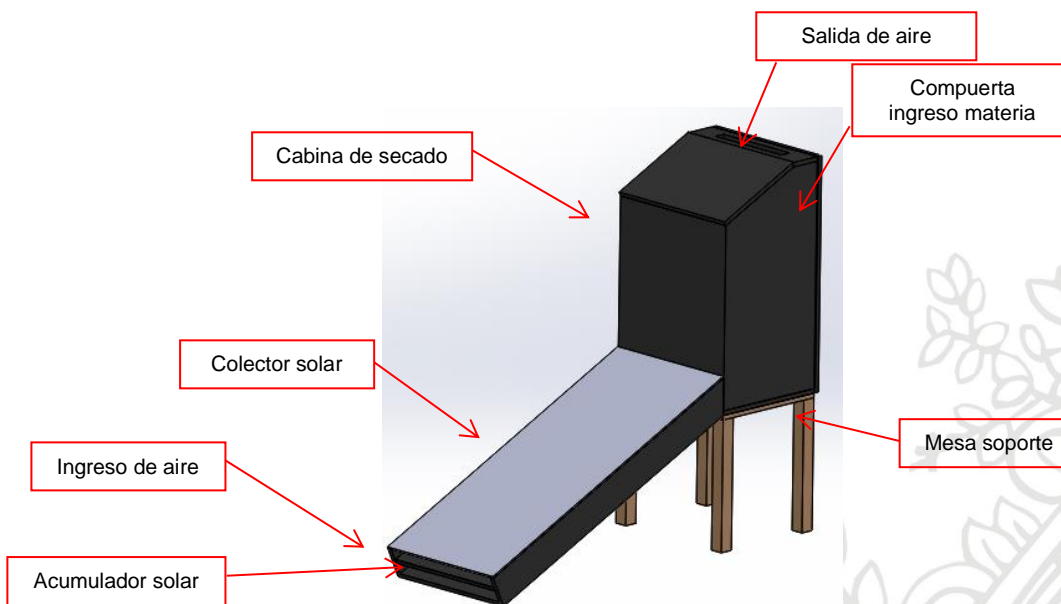


Ilustración 4: Esquema general de modelo de deshidratador solar seleccionado
Fuente: Elaboración propia

Etapa 4: Diseño de detalle

El esquema general presenta cada una de las partes importantes del deshidratador a diseñar. Ahora se procede a hacer el diseño específico de cada uno de estos elementos según los requerimientos de cada uno de ellos, para esto se establece la materia prima a deshidratar. En la *tabla 7* se presenta una lista de frutos que se han trabajado en la literatura y de los cuales se tiene la información experimental necesaria para hacer los cálculos de diseño. Además, también se establece la humedad relativa y la temperatura del ambiente con la que se va a trabajar, la cual se obtuvo de los datos de promedios climatológicos de los años 1981 hasta el 2010 en el departamento de Antioquia recopilados por IDEAM⁴⁰.

Masa (kg)	5	Temp amb (C°) 22		
Hum relativa ambiente	83,4%			
Alimento	% humedad inicial	% humedad final	Densidad (kg/m ³)	Temp max
Manzana	85%	18%	1.022	50
Banano	80%	15%	1.120	70
Mango	85%	15%	1.110	65
Papa	75%	13%	1.030	55
Uva	85%	18%	1.050	55

Tabla 7: Datos de entrada para cálculos.
Fuente: Elaboración propia

⁴⁰ IDEAM. Atlas Interactivo [en línea]. Disponible en: <http://atlas.ideam.gov.co/>

- **Dimensionamiento**

De los diferentes alimentos para deshidratar, se selecciona la manzana como dato de entrada para el cálculo inicial del deshidratados y cada uno de sus elementos, debido a tiene la menor temperatura máxima soportada y su humedad inicial es una de las más altas.

Con esto se determinan las dimensiones de la cámara de secado.

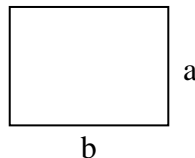
$$A_s = \frac{\text{masa}}{\rho \times e}$$

Donde ρ (1.022 kg/m^3) es la densidad, e ($0,005 \text{ m}$) es el espesor de la capa de materia prima a secar, masa (5 kg) es la cantidad de alimento a deshidratar en kg y A_s es el área de superficie que se requiere para secar esa cantidad alimento. Con esto se obtiene un área superficial de $A_s = 0,978 \text{ m}^2$.

Con este dato, se puede calcular el número de bandejas necesarias para ubicar todo el material dentro de la cámara de secado, las dimensiones de la cámara de secado son supuestas en base a la restricción de fácil traslado y bajo peso del sistema.

$$N_b = \frac{A_s}{A_b}$$

Donde N_b es número de bandejas y A_b es el área de la bandeja, la cual depende de las dimensiones de la base de la cámara de secado.



Las dimensiones establecidas para la bandeja fueron de $a = 0,52 \text{ m}$ y $b = 0,60 \text{ m}$, lo cual da un área de bandeja de $A_b = 0,312 \text{ m}^2$ y una cantidad de bandejas de $N_b = 4$ unidades. El siguiente paso es saber la cantidad de agua a evaporar del producto, esto se obtiene de la siguiente manera.

$$m_w = \text{masa} \times \left(\frac{h_i - h_f}{1 - h_f} \right)$$

Donde m_w es la masa de agua, h_i ($0,85$) es la humedad inicial del producto y h_f ($0,18$) es la humedad final del producto luego del proceso de deshidratado⁴¹. El resultado de este cálculo da como resultado una masa total de agua de $m_w = 4,085 \text{ kg de agua}$. La energía requerida para evaporar esa masa de agua se calcula con la siguiente expresión.

$$E_p = m_w \times L_v$$

⁴¹ PAPADE, C. V. & BODA, M. A. Design and development of indirect type solar dryer with energy storing material. In: International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering. India: december, 2014, vol. 12, p. 111. ISSN: 2349-2163

Siendo E_p la energía requerida para evaporar el agua y L_v (2.257 kJ/kg) el calor latente de evaporización del agua, el cual se obtiene de la *Tabla A-3 del libro de termodinámica de Cengel*⁴². Con esto se tiene que la energía requerida para evaporar $4,085 \text{ kg}$ de agua es de $E_p = 9.220,671 \text{ kJ}$. En cuanto a la ganancia de energía del aire por radiación, se calcula de la siguiente manera.

$$E_a = I_c \times A_c \times \eta_c$$

Donde I_c ($481,1 \text{ w/m}^2$) es la intensidad solar promedio, la cual se obtuvo de la página oficial de IDEAM⁴³ para el departamento el municipio de Medellín, A_c ($0,96 \text{ m}^2$) es el área superficial del colector la cual se evidencia en la *ilustración 5*, y η_c es la eficiencia del colector que se estableció del 50% basado en la literatura. Con esto se tiene una ganancia de $E_a = 230,928 \text{ J/s}$.

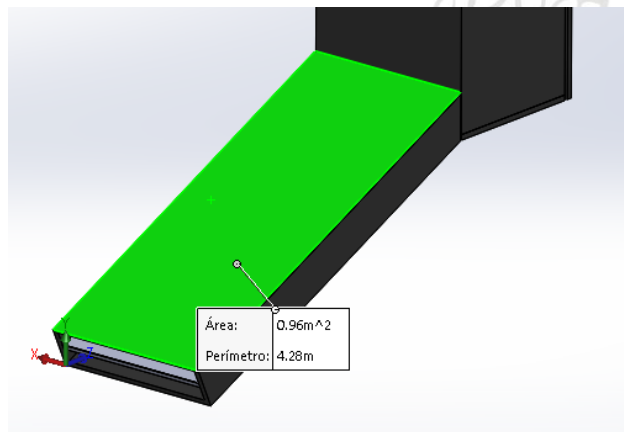


Ilustración 5: Área superficial del colector solar
Fuente: Elaboración propia.

La energía ganada por el aire multiplicado por el tiempo de secado debe ser equivalente a la energía requerida para evaporar la masa de agua más la energía perdida por la conducción del calor por las paredes de la cámara de secado, esto se expresa a continuación.

- **Pérdida de calor por resistencia a la conducción.**

$$R_t = \frac{e_{mad}}{K_{mad} \times A_{ext}}$$

$$Q_p = \frac{T_s - T_a}{R_T}$$

⁴² ÇENGEL, Yunus A. y BOLES, Michael A. Termodinámica. In: McGraw-Hill, p. 912, ed. 7, 2012.

⁴³ IDEAM. Atlas Interactivo [en línea]. Disponible en: <http://atlas.ideam.gov.co/>

Donde:

R_t : resistencia total a la conducción

K_{mad} : conductividad térmica de la madera (0,94 w/m°C)

A_{ext} : área exterior de la cámara de secado según la ilustración 6. (2,49 m²)

e_{mad} : espesor de la madera (0,02 m)

Q_p : calor perdido por resistencia a la conducción.

T_s = temperatura de superficie interna (50°C o 323.15)

T_a = temperatura ambiente (22°C o 295,15 K)

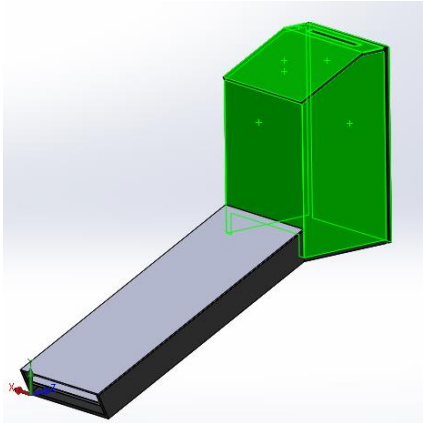


Ilustración 6: Área externa de la cámara de secado

Fuente: Elaboración propia.

Reemplazando los valores y realizando los cálculos se tiene un calor total perdido de $Q_p = 3.276,840$ w.

- **Tiempo de secado**

Este se obtiene con la siguiente expresión y da como resultado $t_d = 11,095$ horas.

$$E_p + Q_p = E_a \times t_d$$

$$t_d = \frac{E_p + Q_p}{E_a}$$

De la expresión del calor ganado por el aire, se despeja el flujo másico de aire de la siguiente forma.

$$E_a = I_c \times A_c \times \eta_c = m_a \times C_{p_a} \times \Delta T$$

$$m_a = \frac{I_c \times A_c \times \eta_c}{C_{p_a} \times \Delta T}$$

Donde C_{p_a} ($1,003 \text{ kJ/kg.K}$) es el calor específico del aire a temperatura ambiente (22°C) el cual se obtiene de la *Tabla A-2 del libro de termodinámica de Cengel*⁴⁴. Obteniendo como resultado $m_a = 0,00822 \text{ kg/s}$. Teniendo el flujo másico, se calcula el flujo volumétrico con la siguiente expresión.

$$V_a = \frac{m_a}{\rho_a}$$

Siendo V_a el flujo volumétrico de aire y $\rho_a = 0,9288 \text{ kg/m}^3$ la densidad del aire a 22°C de temperatura, presión $79,495 \text{ KPa}$ y humedad relativa de 83% para el municipio de Medellín. Con estos valores se tiene un flujo de $V_a = 0,00885 \text{ m}^3/\text{s}$. Del flujo volumétrico se puede obtener la velocidad del aire requerida para el proceso de secado y así mismo dimensionar el área de ingreso de aire al colector solar.

$$v_a = \frac{V_a}{A}$$

v_a hace referencia a la velocidad del aire y A es el área de ingreso de aire al colector, la cual se presenta en la *ilustración 7* y tiene un área total de $A = 0,0672 \text{ m}^2$. Lo cual da una velocidad de aire total de $v_a = 0,132 \text{ m/s}$. Por otro lado, el colector solar tiene una capacidad de generación de calor la cual se puede obtener por medio de la ecuación.

$$P_c = V_a \times \rho_a \times C_p \times (T_s - T_a)$$

El colector debe tener un potencial calorífico según las condiciones ambientales inicialmente establecida de $P_c = 230,928 \text{ J/s}$.

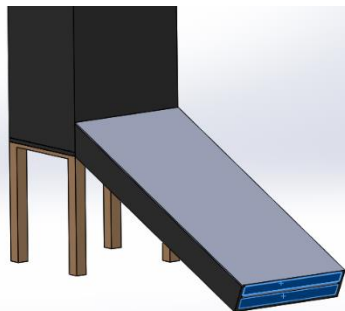


Ilustración 7: cálculo de área de ingreso de aire al colector.
Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta que el colector tiene una eficiencia de 50% , en este caso, la potencia calorífica que debe tener el colector sería $P_c = 346,392 \text{ w}$, y considerando que se tiene un promedio de 8 horas de sol en la cual la radiación solar media es de $481,1 \text{ w/m}^2$, la energía solar total mínima incidente se expresa de la siguiente manera.

$$E_c = P_c \times t_s$$

⁴⁴ ÇENGEL, Yunus A. y BOLES, Michael A. Termodinámica. In: McGraw-Hill, p. 911, ed. 7, 2012.

Donde t_s (28.800 s) es el tiempo de radiación solar efectiva, que para el caso de Antioquia se toma como referencia los datos de la ciudad de Medellín que es de 8 horas. En este tiempo se requiere una energía total de $E_c = 9,976 \text{ MJ}$, la cual debe proporcionar el sol y se valida de la siguiente manera.

$$I = \text{Radiación solar} \times t_s$$

Donde la radiación solar anual promedio en Medellín es de $4,329 \text{ wh/m}^2$ durante las 8 horas de sol efectivas, se tiene que por cada hora se puede aprovechar $481,1 \text{ w/m}^2$ de esta energía. La potencia calorífica que se puede obtener del sol durante 8 horas de exposición en el municipio de Medellín es de $I = 15,580 \text{ MJ/m}^2$. Conociendo el potencial calorífico que tiene la energía solar en Medellín y la potencia calorífica que se requiere del colector, se puede calcular el área efectiva del colector para garantizar la dicha energía requerida para el proceso de secado.

$$A_{\text{efectiva}} = \frac{E_c}{I}$$

Del cálculo se tiene un área efectiva de colector $A_{\text{efectiva}} = 0,615 \text{ m}^2$ la cual, comparada con el área actual del colector, es evidentemente un 36% menor. El resumen de cada uno de los datos calculados se resume en la *tabla 8*.

RESUMEN DE CÁLCULOS		
Producto a secar	Manzana	
Masa del producto	5	kg
Humedad inicial del producto	85	%
Humedad final del producto	12	%
Humedad relativa del ambiente	83	%
Temperatura ambiente	22	°C
Densidad del producto	1.022	Kg/m ³
Temperatura de secado	50	°C
Área de secado	0,978	m ²
# de bandejas	4	Unidad
Masa de agua a evaporar	4,085	kg
Energía requerida para evaporar el agua	9.220,671	kJ
Ganancia de energía del aire por radiación	230,928	J/s
Total calor perdido	1.316	kJ
Tiempo de secado estimado	11,095	Hora
Flujo másico de aire requerid	0,00822	kg/s
Flujo volumétrico de aire	0,00885	m ³ /s
Velocidad del aire requerida	0,132	m/s
Eficiencia del colector	50	%
Potencia calorífica del colector solar	346,392	w
Área efectiva del colector	0,615	m ²

Tabla 8: Resumen de cálculos

Fuente: Elaboración propia

- **Cálculo de las propiedades ópticas de la cubierta transparente**

Ángulo de refracción.

$$\theta_r = \sin^{-1} \frac{\sin \theta_T}{n}$$

Donde n es el índice de refracción del material cristalino (acrílico = 1,50) y θ_T es el ángulo de inclinación del colector el cual se obtiene en base a la latitud (ϕ) del lugar que para este caso es Antioquia y tiene el valor de 6,55 y se calcula con la siguiente expresión.

$$\theta_T = 0,69 + (3,7 \times |\phi|)$$

De esta manera se obtiene un ángulo de inclinación para el colector de 25° y un ángulo de refracción para la cubierta transparente de 16,36°.

Transmitancia simple del acrílico.

$$\tau = e^{-kd}$$

Donde k es el coeficiente de absorción lineal del acrílico (65,3 m⁻¹) y d es el espesor de la cubierta (0,004 m), teniendo una transmitancia de $\tau = 0,77$.

Coefficiente de reflexión de la interfaz acrílico-aire.

$$r = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 = 0,04$$

Transmitancia del acrílico.

$$T = \tau \times \left(\frac{1-r}{1+r} \right) = 0,71$$

Absortancia del acrílico.

$$a = 1 - \tau = 0,23$$

Temperatura de la cubierta transparente

$$T_c = \frac{T_f + T_a}{2} = 309,15 \text{ K}$$

- **Cálculo de almacenamiento de energía térmica en lecho de rocas.**

Cálculo del volumen del lecho de rocas.

Las dimensiones de la placa acumuladora (*ilustración 8*) que tiene el colector solar son: $a = 0,02 \text{ m}$, $b = 0,6 \text{ m}$ y $l = 1,5 \text{ m}$

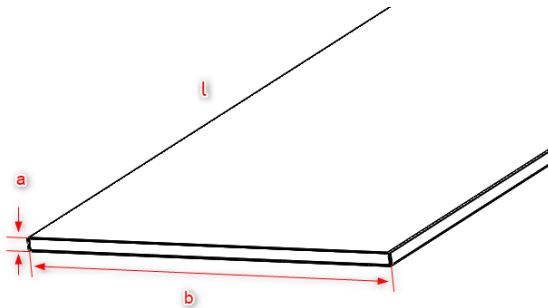


Ilustración 8: Esquema de tabla de piedras
Fuente: Elaboración propia

$$V_{ro} = a \times b \times l = 0,02 \times 0,6 \times 1,5 = 0,018 \text{ m}^3$$

Masa del lecho de rocas.

$$m_{ro} = V_{ro} \times \rho_{ro}$$

Siendo $\rho_{ro} = 2.724 \text{ kg/m}^3$ la densidad de la roca, obteniendo así una masa equivalente a $m_{ro} = 48 \text{ kg}$.

Diferencia de temperatura para la placa de rocas.

$$\Delta T = T_s - T_a = 28^\circ\text{C}$$

Capacidad volumétrica de la placa de rocas.

$$C_{V_{ro}} = \rho_{ro} \times C_{p_{ro}}$$

Donde $C_{p_{ro}} = 0,88 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ es el Calor específico de la roca. La capacidad volumétrica calculada de la placa es $C_{V_{ro}} = 2.397,12 \text{ kJ/m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$.

Calor sensible de la placa de rocas.

$$Q_{S_{ro}} = V_{ro} \times C_{V_{ro}} \times \Delta T = 1.208,15 \text{ kJ}$$

El resumen de las propiedades de la placa acumuladora se presenta en la *tabla 9*.

PROPIEDADES DEL COLECTOR		
Ángulo de inclinación del colector	25	°
Ángulo de refracción del acrílico	16,36	°
Transmitancia simple del acrílico	0,77	
Coefficiente de reflexión de la interfaz acrílico-aire	0,04	
Transmitancia del acrílico	0,71	
Reflexión del acrílico	0,06	
Absortancia del acrílico	0,23	
Temperatura de la cubierta transparente	309,15	K
Volumen de la placa de rocas	0,018	m ³
Densidad de la roca	2.724	Kg/m ³
Masa de la placa de rocas	49	kg
Calor específico de la roca	0,88	kJ/kg °C
Conductividad térmica de la roca	2	w/m °C
Capacidad volumétrica de la roca	0,88	kJ/m ³
Calor sensible de la placa de rocas	1.208,15	J
Densidad del acero	7.850	Kg/m ³
Calor específico del acero	460	J/kg K
Conductividad térmica del acero	52	w/m °C
Espesor de la lámina de acero	0,00121	m

Tabla 9: Resumen de propiedades de la placa acumuladora
Fuente: Elaboración propia

- **Modelación del diseño**

Luego de tener el dimensionar el deshidratador, establecer las condiciones de trabajo y sus puntos críticos, se procede a realizar la modelación y simulación de este con el módulo Fluent del software ANSYS 2020 R1. El objetivo de esta simulación es verificar el comportamiento de las corrientes de aire al interior del deshidratador y la distribución de la temperatura.

Geometría.

Para poder realizar la simulación del modelo, se debe tener en cuenta que el volumen de aire contenido dentro del deshidratador es el fluido a simular, por ello se debe extraer de la geometría.

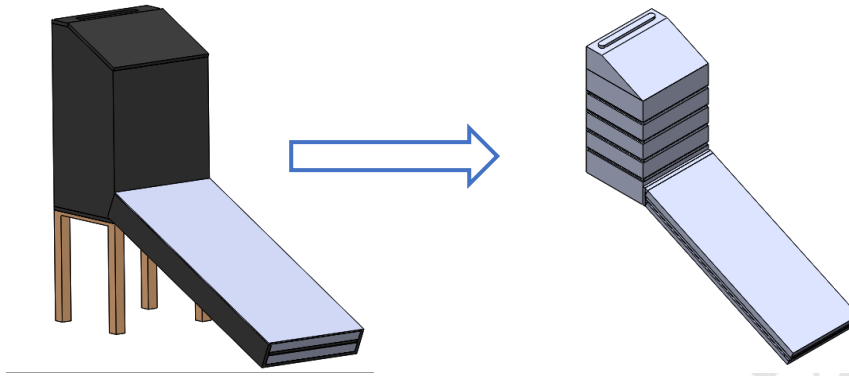


Ilustración 9: Extracción de volumen de fluido.
Fuente: Elaboración propia

Mallado.

Debido que se contaba con una versión académica del software, se tienen alguna limitación al momento de ejecutar una simulación, entre estas limitaciones está el número máximo de elementos en el mallado, el cual debe ser menor a 512.000 nodos/celdas. Para este caso, se realizó un mallado con 642.217 nodos y 227.114 elementos en el cual la mayor parte de los cuerpos tienen formas hexaédricas y las zonas más desiguales como la salida del aire, en forma de tetraedros. Para validar la malla, se utilizaron los siguientes criterios:

- Calidad ortogonal (orthogonal quality) > 0.15
- Oblicuidad o asimetría (skewness) < 0.94

El resultado del mallado se presenta en la *ilustración 10*.

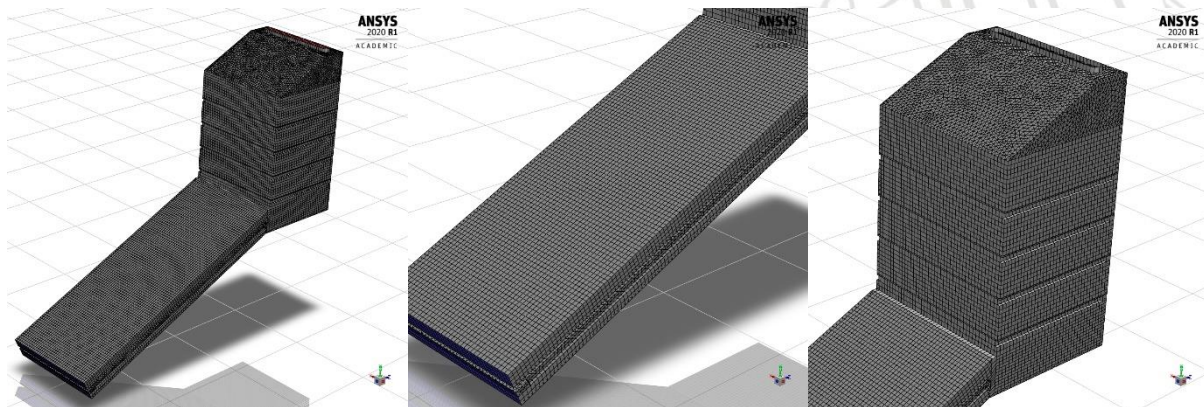


Ilustración 10: Mallado de la geometría.
Fuente: Elaboración propia

Modelo de desarrollo.

– Ecuaciones de gobierno.

El proceso de secado de la materia en el interior del deshidratador solar se puede expresar por medio de 3 ecuaciones principales de conservación como son la energía, el momento y la masa. A continuación, se presentan cada una de estas.

1. La ecuación de continuidad, la cual representa la conservación de la masa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u}) = 0$$

Donde \vec{u} es la velocidad del fluido y ρ es la densidad del aire.

2. Ecuación de Navier-Stokes, la cual representa la conservación del momento.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{u}) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla P + \nabla \bar{\tau} + \rho \vec{g} + S_m$$

Donde $\bar{\tau}$ es el tensor de esfuerzo cortante de Reynolds y S_m es el término fuente para la cantidad de movimiento.

3. Ecuación de la Energía.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{u}(\rho E + P)) = \nabla \cdot (-\vec{q} + \bar{\tau} \cdot \vec{u}) + S_h$$

Donde S_h es el término fuente de calor, \vec{q} es el vector flujo de calor (positivo hacia adentro), y E es la energía total (suma de energía interna y energía cinética) representada por

$$E = h - \frac{P}{\rho} + \frac{u^2}{2}$$

Siendo h la entalpia sensible del aire.

– Modelo de radiación.

El método para solucionar la ecuación de transferencia radiactiva (RTE) seleccionado para este trabajo es el método de ordenadas discretas (discrete ordinates method) configurado a dos bandas que representan el espectro solar. La banda (0,4 – 2,4 μm) se utiliza para cubrir la radiación solar incidente, y la segunda banda (2,5 – 180 μm) corresponde a la zona de radiación IR⁴⁵.

⁴⁵ SANGHI, Achint, AMBROSE, RP Kingsly & MAIER, Dirk. CFD simulation of corn drying in a natural convection solar dryer. In: Drying Technology. Vol. 18, No.7 2018; pages 862. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1359622>

$$\frac{dI_n}{ds} = k_n(I_{bn} - I_n)$$

El término del lado izquierdo representa el cambio en la intensidad de la radiación a lo largo de un vector de dirección y el de la derecha es la diferencia entre la radiación emitida y la absorbida.

Proceso de simulación

La configuración de la simulación se realizó según los datos presentados en la *tabla 10*. Además, se estableció el volumen de aire ocupado por las bandejas como un medio poroso formado por rodajas de manzana la cual tiene un valor de 24,72% según el trabajo realizado por Mejía⁴⁶.

MODELOS		MATERIALES			
		Material	Conductividad térmica (w/m-K)	Coefficiente de absorción IR (1/m)	Coefficiente de absorción visible (1/m)
Energy	On	Aire		5.000	5.000
Viscous	RNG K-e	Acrílico	0,21634	10	65,3
Radiation	Discrete Ordinates	Acero	16,27	5.000	5.000
		Madera	0,173		

CONDICIONES DE FRONTERA	
Entrada	Magnitud de la velocidad 0,132 m/s; temperatura del aire 295,15° K; temperatura de cuerpo negro 323,15° K
salida	Presión relativa igual a cero; temperatura total de reflujo 309,15° K; temperatura de cuerpo negro 323,15° K
Acrílico	Coefficiente de transferencia de calor por convección 0,955; temperatura de flujo libre 295,15° K; emisividad de onda larga 0,95
Paredes	Flujo de calor saliente 1.316 w/m ² ; Madera de 0,02m de espesor; emisividad interna de radiación directa 0,81; emisividad interna de IR 0,92
Lámina acumulador	Coefficiente de transferencia de calor por convección 0,955; temperatura de flujo libre 295,15° K; emisividad interna de radiación directa 0,81; emisividad interna de IR 0,92

Tabla 10: Datos de entrada para simulación de modelo de deshidratador
Fuente: Elaboración propia

⁴⁶ MEJÍA ÁGUILA, Reina Andrea. Impregnación al vacío de fructooligosacáridos de yacón (*Smallanthus sonchifolius* Poepp & Endl.) en manzana. Tesis para optar el título de Ingeniero de industrias alimentarias. Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina, facultad de industrias alimentarias. 2015. Página 48.

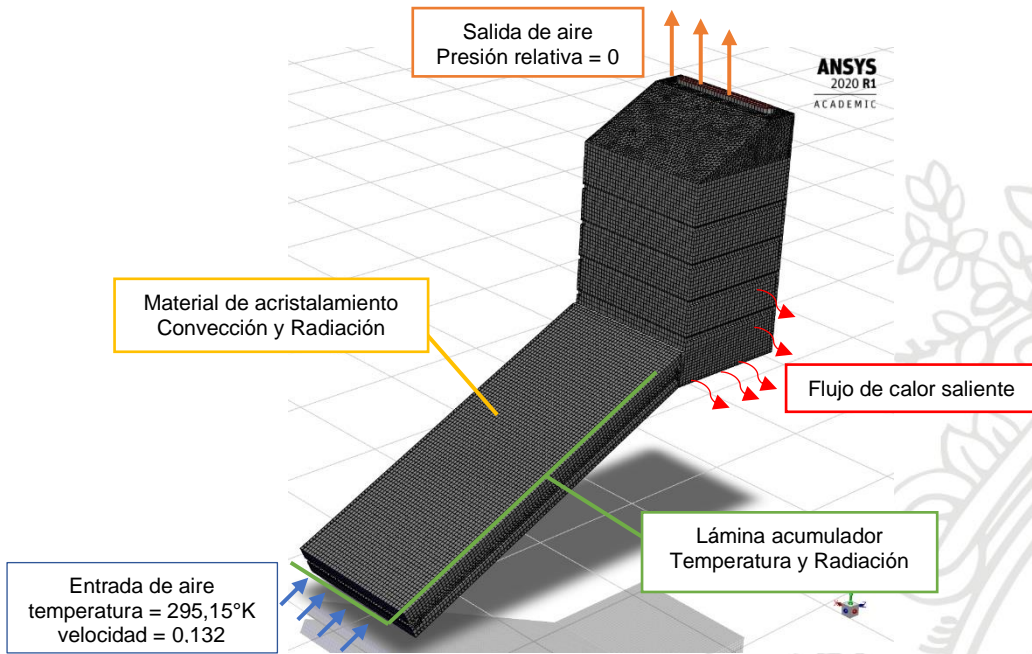


Ilustración 11: Esquema de las condiciones de ingreso y salida de aire.
Fuente: Elaboración propia

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Tras la ejecución paso a paso de la metodología del proceso de diseño, se obtiene como resultado final la geometría presentada en las *ilustraciones 12 y 13*.

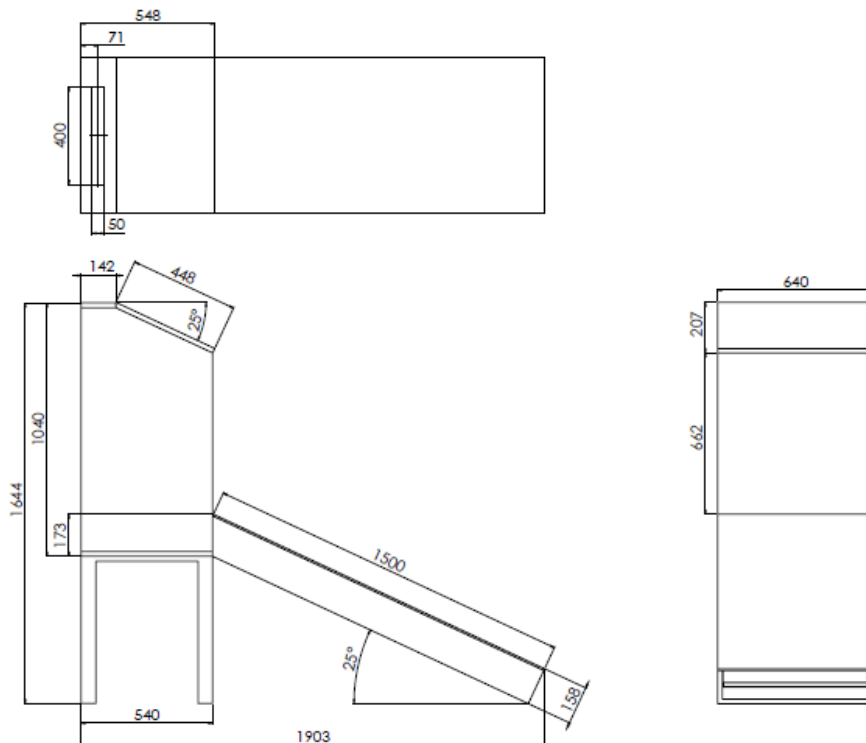
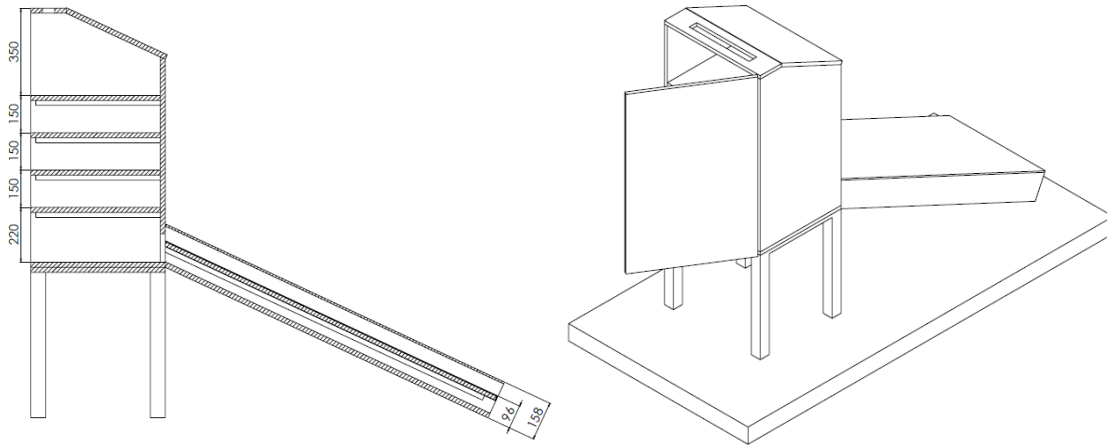


Ilustración 12: Vista frontal, lateral y superior (todas las medidas en mm)
Fuente: Elaboración propia



**Ilustración 13: Vista en corte e isométrica del modelo de deshidratador solar (todas las medidas en mm).
Fuente: Elaboración propia**

De los cálculos realizados, se tiene que el área del colector diseñado para el deshidratador está un 36% por encima del área óptima, teniendo en cuenta que la radiación solar es muy variable y que los cálculos se hicieron en base al valor promedio no se considera modificar las dimensiones para optimizar el área. Por otro lado, el tiempo de secado teórico para la manzana, banano, mango, papa y uva se presentan en la *tabla 11*, lo cual, haciendo un paralelo de los resultados obtenidos en el trabajo realizado por Ortiz et al. (2019)⁴⁷ en el cuál realiza el proceso de deshidratado solar por convección natural de rodajas de manzana bajo las condiciones presentadas en la *tabla 12*, obteniendo como resultado un tiempo total de 9 horas, con el tiempo teórico calculado en el presente trabajo para el mismo fruto, es notable que los tiempos son muy próximos teniendo en cuenta la diferencia de radiación solar en los dos casos.

FRUTO	TIEMPO TEÓRICO (horas)
Manzana	11,10
Banano	10,38
Mango	11,18
Papa	9,68
Uva	11,10

**Tabla 11: Tiempo de secado teórico
Fuente: Elaboración propia**

Tipo de convección	Velocidad Promedio (m/s)	Temperatura interior (°C)	Tiempo de secado (h)	% de agua retirada	Irradiancia(W/m2)
Natural		36.53	9	73.27	585.9
Forzado	3.29	32.03	9.3	72.99	585.9

Tabla 12: Resumen de los resultados obtenidos en la deshidratación de manzana mediante las dos tecnologías de secado solar.

Fuente: ORTIZ QUEZADA M. J. et al. Deshidratación de manzana Granny Smith a partir de dos tecnologías de secado. En: Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos. México: 2019, vol. 4. Disponible en <http://www.fcb.uanl.mx/IDCyTA/files/volume4/4/3/57.pdf>

⁴⁷ ORTIZ QUEZADA M. J. et al. Deshidratación de manzana Granny Smith a partir de dos tecnologías de secado. En: Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos. México: 2019, vol. 4. Disponible en <http://www.fcb.uanl.mx/IDCyTA/files/volume4/4/3/57.pdf>

La simulación se realizó con el fin de analizar el comportamiento del fluido y la distribución de temperatura dentro de la cabina de deshidratación. Los resultados de la simulación se presentan en la *ilustración 14* y *15*, los cuales se pueden comparar con los resultados obtenidos por Amanlou y Zomorodian (2010)⁴⁸ que se pueden apreciar en la *ilustración 16* y *17*.

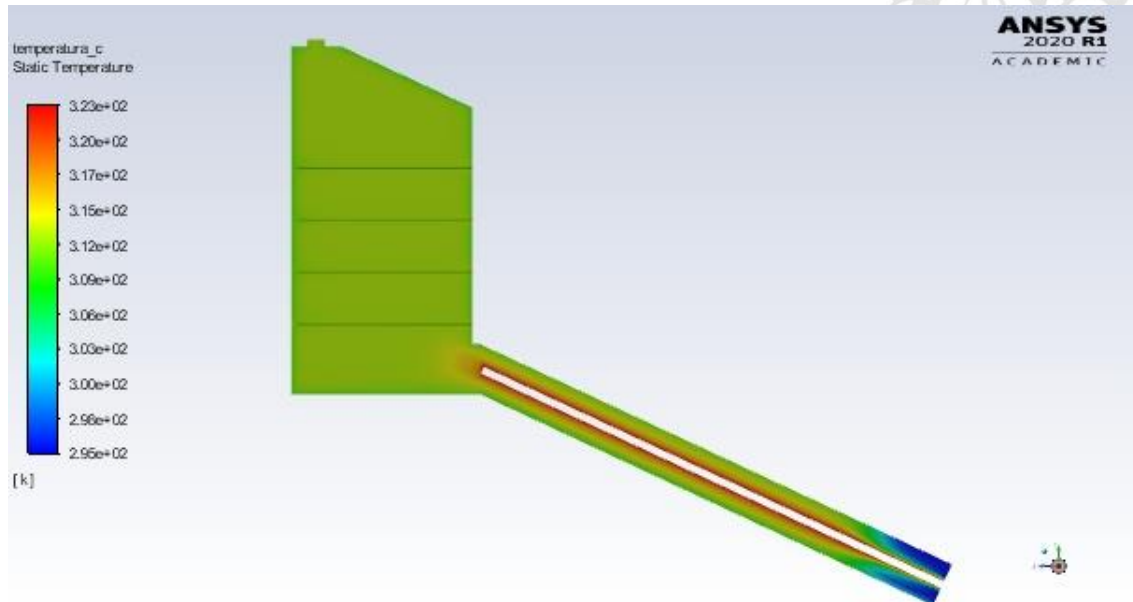


Ilustración 14: Distribución de la temperatura dentro del deshidratador solar
Fuente: Elaboración propia

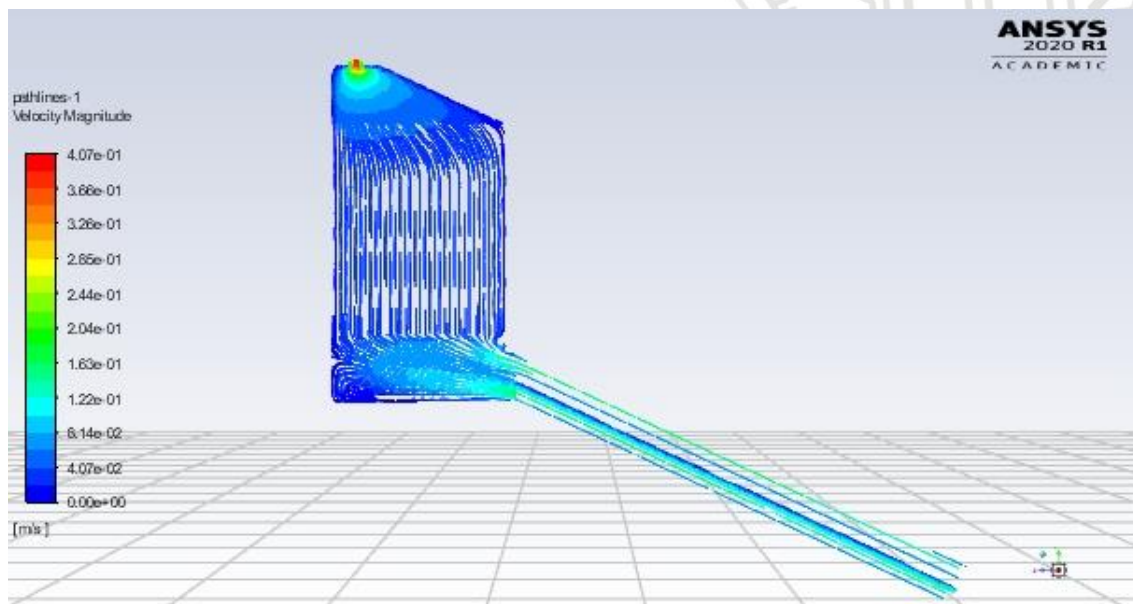


Ilustración 15: Perfil de flujo de aire dentro del deshidratador durante el proceso de secado.
Fuente: Elaboración propia

⁴⁸ AMANLOU, Y. & ZOMORODIAN, A. Applying CFD for designing a new fruit cabinet dryer. In: Journal of Food Engineering. Vol. 101, November 2010; pages 12-13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.06.001>

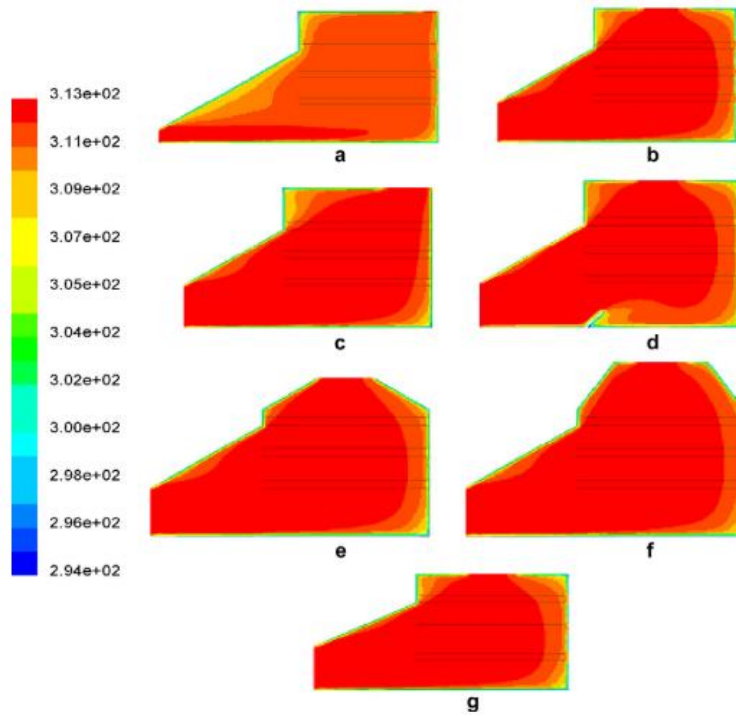


Ilustración 16: Perfiles de distribución de la temperatura del aire de secado para los siete diseños (resultados de simulación CFD), temperatura del aire de entrada = 313 K.

Fuente: AMANLOU, Y. & ZOMORODIAN, A. Applying CFD for designing a new fruit cabinet dryer. In: Journal of Food Engineering. Vol. 101, November 2010; pages 12.

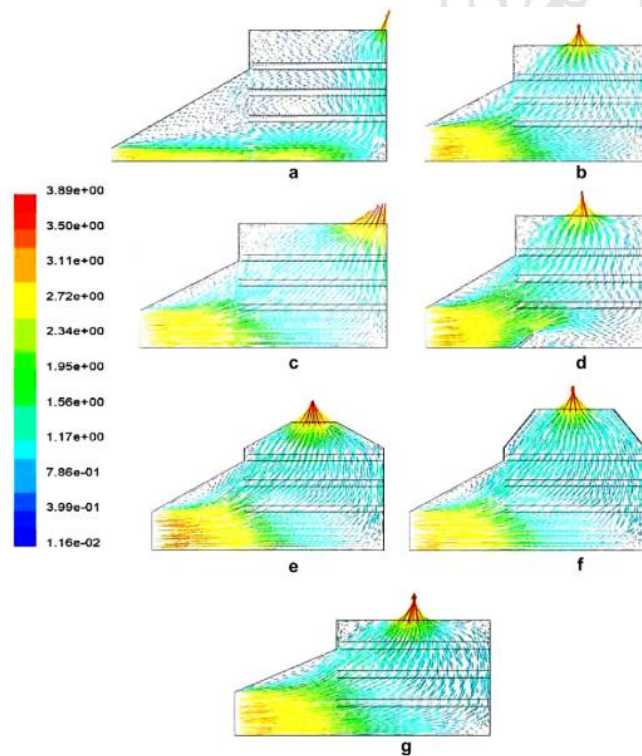


Ilustración 17: Perfiles de distribución de la velocidad del aire para los siete diseños (resultados de la simulación CFD) a una velocidad del aire de entrada = 3 m/s

Fuente: AMANLOU, Y. & ZOMORODIAN, A. Applying CFD for designing a new fruit cabinet dryer. In: Journal of Food Engineering. Vol. 101, November 2010; pages 13.

La distribución de la temperatura que presenta los resultados de la simulación dentro de la cámara de secado es parecida a la distribución de los diseños desarrollados en el trabajo de Amanlou y Zomorodian excepto al diseño (a), el cual es considerado poco eficiente posiblemente por el tamaño de la entrada y la salida de aire. Por otro lado, teniendo en cuenta que durante la simulación se consideró la zona porosa conformada por las rebanadas de alimentos cortados, se hace evidente que el comportamiento del vector velocidad al pasar por esta zona es laminar, aunque antes de esta tiende a formar una zona de reflujo en la parte baja posterior de la cabina al igual que las geometrías (b) y (g) evaluados por Amanlou y Zamorodian, y quienes fueron los que dieron mejor resultados en sus análisis, por facilidad de fabricación y simplicidad.

CONCLUSIONES

Finalmente, tras realizar una revisión exhaustiva de los diferentes modelos de deshidratadores solares que trabajan por convección natural que están disponible en la literatura, se tomó la decisión de trabajar con un modelo tipo gabinete porque cumplía los requerimientos básicos establecidos para el diseño y además se adaptaba a los deseos, ofreciendo un ambiente controlado para el deshidratado de frutas, una temperatura de trabajo entre los 30 y 60°C, una capacidad para almacenar 5kg de frutas en forma de rodajas, un sistema 100% solar, bajo costo de fabricación y mantenimiento, entre otras. En tanto al proceso de simulación, se logró por medio del módulo Fluent de ANSYS, analizar la distribución de la temperatura y el comportamiento del fluido dentro del gabinete, aunque con limitaciones por contar con la versión académica del software la cual no permitió hacer una evaluación de la independencia de mallado o reproducir el modelo con una malla más fina que arrojara un mayor detalle de las zonas de flujo. El modelo de radiación con el cual se cuenta en este módulo Fluent, ofrece la posibilidad de calcular los valores de radiación solar según las coordenadas del sitio, fecha y hora, brindando así valores cercanos a los reales.

Tras evaluar el diseño inicial, se comprobó a través de los cálculos que el área del colector está sobredimensionada un 36% del área óptima, aun sabiendo esto, no se modificó el modelo para responder a los tiempos de baja radiación, ya que los cálculos se realizaron con el valor promedio anual de ésta en la ciudad de Medellín.

Para concluir, la implementación de cabinas de deshidratación solar por convección es una herramienta que permite controlar el proceso de secado de los alimentos, reduciendo el riesgo de oxidación y contaminación por parte del medio ambiente, así mismo, el tiempo de secado es mucho menor que los medios convencionales. Por otra parte, debido a que el presente trabajo tenía como objetivo un diseño conceptual, no se presentan detalles específicos de construcción, solo detalles geométricos generales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVAREZ CABRALES, Alexis. Método para el diseño conceptual mecánico basado en la trazabilidad de los requerimientos funcionales. Resumen de tesis presentada en opción al grado científico de doctor en ciencias técnicas agropecuarias. Mayabeque: Universidad Agraria de La Habana "Fructuoso Rodríguez Pérez". Facultad de Ciencias Técnicas. Centro de Mecanización Agropecuaria. 2016. 8 p.

AMANLOU, Y. & ZOMORODIAN, A. Applying CFD for designing a new fruit cabinet dryer. In: Journal of Food Engineering. Vol. 101, November 2010; pages 8-15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.06.001>

BEHERA, Debashree & DAS, Shiv Sankar. Design and fabrication of Forced Convection Cabinet type of solar dryer for drying fruits and vegetables. In: International Journal of Management, Technology and Engineering. May 2019. ISSN: 2249-7455

BLANCO ROMERO, María Elena. Metodología para el diseño de máquinas adaptadas a comunidades en desarrollo [en línea]. Plan de investigación para doctorado en sostenibilidad. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya. Programa de Doctorado en Sostenibilidad. 2015.

CABARROCAS, Joan. Disseny Conceptual basat en la síntesi funcional de sistemes d'accionament amb múltiples modes d'operació. Tesis en opción al grado científico de Doctor Ingeniero Industrial. Catalunya: Universitat Politècnica de Catalunya. 1999.

CALLE CRUZ, Saenss. Diseño de un deshidratador solar para optimizar el tiempo de secado de almendras de cacao [en línea]. Tesis para obtener el título profesional de ingeniero mecánico electricista. Perú: Universidad César Vallejo. Facultad de ingeniería. Escuela académico profesional de ingeniería mecánica eléctrica. 2017. Disponible en: <http://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/17268>

CASTAÑEDA MIRANDA, Alejandro, et al. Desarrollo de un horno solar para el secado de plantas y vegetales usando control difuso. En: Acta Universitaria. Vol. 22, abril-mayo 2012; páginas 14-19. ISSN: 0188-6266

ÇENGEL, Yunus A. y BOLES, Michael A. Termodinámica. En: McGraw-Hill, ed. 7, 2012.

ÇENGEL, Yunus A., GHAJAR, Afshin y D'BORNEVILLE Erika. Transferencia de calor y masa: fundamentos y aplicaciones. En: McGraw-Hill, ed. 4, 2011.

CIMBALA, J. M.; ÇENGEL, Yunus A. Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones. 2001.

CORTEZ CALERO, Carla Patricia. Estudio de un secador solar indirecto por convección natural para el deshidratado de frutas y vegetales en Nicaragua [en línea]. Tesis previa a optar al Título de Máster en Energías Renovables y Medio Ambiente. Nicaragua: Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, León. Facultad de Ciencias y Tecnología. Maestría en energías renovables y medio ambiente 1ra.Ed. 2014. Disponible en: <http://riul.unanleon.edu.ni:8080/jspui/retrieve/7595>

DARABI, H., et al. Design a cabinet dryer with two geometric configurations using CFD. In: Journal of Food Science and Technology. Vol. 52, April 2013; pages 359–366. DOI: 10.1007/s13197-013-0983-1

Departamento Nacional de Planeación (DNP). 28 de marzo 2016 [Consultado: 03 de marzo de 2020]. Disponible en: <https://www.dnp.gov.co/Paginas/Colombianos-botan-9,76-millones-de-toneladas-de-comida-al-a%C3%B1o.aspx>

DEVAN, P.K. et al. Solar drying of fruits – A comprehensive review. In: Materials Today: Proceedings. Mayo 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.041>

EGUILLOR RECABARREN, Pilar. "Pérdida y desperdicio de alimentos en el sector agrícola: avances y desafíos.": Oficina de estudios y políticas agrarias, 2019.

FERRER REAL, Inés. Contribución metodológica en técnicas de diseñar para fabricación. Tesis doctoral. Girona: Universitat de Girona. Proyectos de Innovación Tecnológica en la Ingeniería de Producto y Procesos. Departamento de Ingeniería Mecánica y de la Construcción Industrial. 2007.

GARCÍA, Luis Eduardo, et al. Diseño y construcción de un deshidratador solar de frutos tropicales. En: Avances: Investigación en Ingeniería. Vol. 9, No.2 2012; páginas 09-19.

IDEAM. Atlas Interactivo [en línea]. Disponible en: <http://atlas.ideam.gov.co/>

IRANMANESH, Masoud, SAMIMI AKHIJAHANI, Hadi & BARGHI JAHROMI, Mohammad Saleh. CFD modeling and evaluation the performance of a solar cabinet dryer equipped with evacuated tube solar collector and thermal storage system. In: Renewable Energy. Vol. 145, 2020; pages 1192-1213. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.038>

JARAMILLO, Laura y RÚA, Eddy Y. "Aprovechamiento gastronómico de frutas en sobrecosecha de la plaza minorista José María, Medellín (Colombia)". En: Revista de Turismo, Patrimonio y Desarrollo: Confederación Panamericana de Escuelas de Hotelería, Gastronomía y Turismo (CONPEHT). Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia: 2019, Publicación semestral, nro. 9.

KUMAR, Mahesh, SANSANIWAL, Sunil Kumar & KHATAK, Pankaj. Progress in solar dryers for drying various commodities. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 55, March 2016; pages 346-360. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.158>

LANDWEHR, Thomas. La deshidratación de frutas: métodos y posibilidades. 1999.

MAGAÑA, Sara, et al. Aprovechamiento de frutas y hortalizas de temporada de la Región de Tabasco, mediante la deshidratación del producto, utilizando una estufa solar. En: Revista de Energías Renovables. Vol. 3, junio 2019; páginas 35-40. DOI: 10.35429/JRE.2019.9.3.35.40

MALEKJANI, Narjes & JAFARI, Seid Mahdi. Simulation of food drying processes by computational fluid dynamics (CFD); recent advances and approaches. In: Trends in Food Science and Technology. Vol. 78, August 2018; pages 206-223. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.06.006>

MARROQUÍN-CANO, Sergio F., et al. Diseño y construcción de un deshidratador solar indirecto de mango ataulfo por convección forzada Revista de Innovación Sistemática Introducción usado para la preservación de alimentos. En: Revista de Innovación Sistemática. Vol. 1, No.2 junio 2017; páginas 9-18.

MARTINES, Enrique. Definiciones de humedad y su equivalencia. ENME, 2007, vol. 1, p. 1-5.

MEJÍA ÁGUILA, Reina Andrea. Impregnación al vacío de fructooligosacáridos de yacón (*Smallanthus sonchifolius* Poepp & Endl.) en manzana. Tesis para optar el título de Ingeniero de industrias alimentarias. Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina, facultad de industrias alimentarias. 2015. Página 48.

ORTIZ QUEZADA M. J. et al. Deshidratación de manzana Granny Smith a partir de dos tecnologías de secado. En: Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos. México: 2019, vol. 4. Disponible en <http://www.fcb.uanl.mx/IDCyTA/files/volume4/4/3/57.pdf>

PAPADE, C. V. & BODA, M. A. Design and development of indirect type solar dryer with energy storing material. In: International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering. Vol. 1, No.12 December 2014; pages 109-114. ISSN 2349-2163

PATEL, Atul & PATEL, Gaurav. Operational augmentation of forced circulation type solar dryer system using CFD analysis. In: Int. Journal of Engineering Research and Applications. Vol. 4, April 2014; pages 265-268. ISSN: 2248-9622

PESCADOR GUEVARA, Diana Marcela, SÁNCHEZ CANO, David Fernando y SEGURO MONTOYA, Juan Camilo. Estudio de prefactibilidad para la producción y comercialización de snacks de frutas deshidratadas y determinación del modelo de negocio. Trabajo presentado como requisito parcial

para obtener el título de Magíster en Administración (MBA). Pereira: Universidad EAFIT. Escuela de Administración. 2014. 25 p.

RIBA ROMEVA, Carles. Diseño concurrente [en línea]. Responsabilidad subordinada. Catalunya: Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, SL, 2002. 226. Disponible en <http://hdl.handle.net/2099.3/36754>

ROCHE, Liset, HERNÁNDEZ, Juan y GARCÍA, Agustín. Diseño conceptual de secador solar a escala piloto para algas marinas. En: Revista Tecnológica Química Universidad de Oriente. Vol. 37, No.2 ago. 2017. ISSN: 2224-6185

RODRÍGUEZ-SÁNCHEZ, Marco, et al. Desarrollo de un prototipo de deshidratador solar instrumentado sustentable. En: Revista de Prototipos Tecnológicos. Vol.2, No.4 junio 2016; páginas 22-29.

SANGHI, Achint, AMBROSE, RP Kingsly & MAIER, Dirk. CFD simulation of corn drying in a natural convection solar dryer. In: Drying Technology. Vol. 18, No.7 2018; pages 859–870. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1359622>

SINGH CHAUHAN, Prashant, KUMAR, Anil & TEKASAKUL, Perapong. Applications of software in solar drying systems: A review. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 51, November 2015; pages 1326-1337. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.025>

TEIXEIRA -DA, Juan Manuel y MALPICA, Freddy Alberto. Desarrollo de un modelo matemático para dimensionar un deshidratador solar directo de cacao. En: Ingeniería Mecánica. vol.19, No.1 ene.-abr. 2016. ISSN: 1815-5944

VEGA, Antonio; CHACANA, Marcelo y LENUS, Roberto. La industria de los alimentos deshidratados y la importancia del control del proceso. En: Departamento de Ingeniería en Alimentos: Universidad de La Serena, enero, 2009.

YANNIOTIS, Stavros & STOFOROS, N. G. Modelling food processing operations with computational fluid dynamics: A review. In: Scientia Agriculturae Bohemica. Vol. 45, 2014; pages 1-10. DOI: [10.7160/sab.2014.450101](https://doi.org/10.7160/sab.2014.450101)