

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

**POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA
Y USO INTEGRAL DEL AGUA**

**CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DE
UN DESHIDRATADOR POR BOMBA DE CALOR**

TESIS DE GRADO

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA
Y USO INTEGRAL DEL AGUA**

PRESENTA:

ESPINOZA GUTIÉRREZ FELIPE DE JESÚS

BAJO LA SUPERVISIÓN DE:

DR. FEDERICO FÉLIX HAHN SCHLAM



APROBADA



CHAPINGO, ESTADO DE MÉXICO, DICIEMBRE DE 2021

CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DE UN
DESHIDRATADOR POR BOMBA DE CALOR

Tesis realizada por **ESPINOZA GUTIÉRREZ FELIPE DE JESÚS** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

DIRECTOR: _____



DR. FEDERICO FÉLIX HAHN SCHLAM

ASESOR: _____



DR. NOÉ VELÁZQUEZ LÓPEZ

ASESOR: _____



DR. PEDRO CRUZ MEZA

CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
DEDICATORIAS	X
AGRADECIMIENTOS	XI
DATOS BIOGRÁFICOS	XII
RESUMEN GENERAL	XIII
GENERAL ABSTRACT	14
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	15
1.1 Referencias	17
2. REVISIÓN DE LITERATURA	18
2.1 Conservación de alimentos	18
2.2 Importancia del deshidratado de alimentos	19
2.3 Deshidratadores solares	21
2.4 Deshidratadoras convectivas	22
2.5 Deshidratadoras por bomba de calor	23
2.5.1 Diferentes formas de aplicación del secado con bomba de calor .	27
2.5.2 Cuantificación de rendimientos durante el secado con bomba de calor	29
2.6 Ciclo de refrigeración	32
2.7 Ciclo de compresión	34
2.8 Bomba de calor	34
2.7.1 Componentes de la bomba de calor	35
2.9 Deshidratadora Convectiva por Bomba de Calor	36
2.10 Referencias	41

3. CONSTRUCTION OF A PROTOTYPE HEAT PUMP DEHYDRATOR FOR MANGO PULP AND PEEL	45
ABSTRACT	45
3.1 INTRODUCTION	46
3.2 Material and Métodos	47
3.3 Construction of the heat pump unit	47
3.3.1 Refrigeration Component Assembly Process	48
3.3.2 Integration of a heat pump to a dehydration chamber prototype.....	48
3.4 Heat pump dehydrator prototype construction process	51
3.5 Discussion and results.....	56
3.6 CONCLUSION	57
3.7 REFERENCES	58
4. AUTOMATIC SAMPLING OF PRODUCT TEMPERATURE AND MOISTURE WITHIN A HEAT PUMP APPLE DRYER	59
Abstract	59
4.1 Introduction	60
4.2 Heat pump dryer	62
4.3 Air temperature, air relative humidity and slice temperature sampling.	62
4.4 Apple slice moisture detection	65
4.5 Results.....	67
4.6 Conclusion	69
4.7 Acknowledgements.....	69
4.8 References	69
5. APÉNDICES	72
5.1 DISEÑO CONCEPTUAL DE LA DESHIDRATADORA POR BOMBA DE CALOR.....	72

5.1.1	Diseño	72
5.1.2	Características técnicas consideradas para el equipo deshidratador. 72	
5.1.3	Plano del prototipo deshidratador.....	73
5.1.4	Proceso constructivo del prototipo vertical	73
5.1.5	Pruebas de funcionamiento	76
5.2	ARTÍCULO PUBLICADO: Automatic Sampling of Product Temperature and Moisture within a Heat Pump Apple Dryer	87

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1 Comparación de un deshidratador por bomba de calor con otros deshidratadores	24
Cuadro 2 Agua en algunos alimentos	30
Cuadro 3 Medida de temperatura, peso y grosor de rodajas de manzana en el nivel 1	77
Cuadro 4 Medida de temperatura, peso y grosor de rodajas de manzana en el nivel 2	78
Cuadro 5 Medida de temperatura, peso y grosor de rodajas de manzana en el nivel 3	79
Cuadro 6 Secado al horno convencional de muestras a diferentes horas durante el proceso de deshidratado.....	84

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 1 Diagrama de un secador solar	22
Figura 2 Diagrama de una secadora convectiva.....	23
Figura 3 Representación psicrométrica del sistema de secado por aire convencional.....	25
Figura 4 Disposición de los componentes de un secador con bomba de calor .	27
Figura 5 Diagrama del ciclo de refrigeración	33
Figura 6 Diagrama de funcionamiento de bomba de calor	34
Figura 7 Diagrama del ciclo de deshidratadoras por bomba de calor	39
Figura 8 Sistema por bomba de calor	40
Figura 9 Dehydrator with temperature and relative humidity sensors	50
Figura 10 Dehydrator structure	51
Figura 11 Refrigeration tools and components	52
Figura 12 Initial phase of construction of the dehumidification chamber	52
Figura 13 Pipes for dehydrated air recirculation.....	53
Figura 14 Air recirculation blower.....	53
Figura 15 Installation of condenser, evaporator and heat exchanger coil for air preheating	54
Figura 16 Compressor installation, system vacuum, charging and calibration of the refrigerant gas pressure	54
Figura 17 Heat pump and dehydration chamber assembly.....	55
Figura 18 Temperature and relative humidity sensors together with electronic control thermostat	55
Figura 19 Equipment operation and preliminary tests of operation	56

Figura 20Relative humidity and temperatures in the dehydration chamber, test 1- hour 8	56
Figura 21Relative humidity and temperatures in the dehydration chamber, test 4 - hour 4	57
Figura 22Block diagram of the heat pump dryer showing the refrigerant and drying chamber paths	62
Figura 23Prototype used to measure fruit temperature showing (a) top view, (b) lateral view with released solenoids, and (c) lateral view after solenoids activation.....	63
Figura 24Flowchart for synchronous product temperature measurement.....	64
Figure25Optical fiber sensor (a) detects apple slice moisture, being (b) composed of a beam splitter, filters and photodiodes.	66
Figura 26Optical fiber sensor measurement correlated apple slice moisture given in grams of water against grams of dried solid content.	66
Figura 27 Temperature apple slices surface plot.	68
Figura 28Moisture area plot of apple slices (a) just introduced to the HPD dryer, and (b) two hours later	68
Figura 29 Carcasa de frigorífico.....	74
Figura 30 Soldadura de compresor y evaporador.....	74
Figura 31 Instalación de ventiladores	75
Figura 32 Instalación de sensores	75
Figura 33 Cambio de ventiladores	76
Figura 34 Primeras pruebas con tres rejillas.....	76
Figura 35 Medida del grosor en fresco	80
Figura 36 Acomodo en parrillas de aluminio	80
Figura 37 Nivel 1 dentro de la cámara de secado.....	80
Figura 38 Toma de temperatura en fresco.....	80
Figura 39 Peso de rodaja de manzana en la hora 2.5	81

Figura 40 Temperatura y humedad relativa general en la hora 3	81
Figura 41 Temperatura de rodaja en la hora 4	81
Figura 42 Muestras antes de ingresar al horno convencional.....	82
Figura 43 Muestras en el interior del horno convencional	82
Figura 44 Muestras al salir del horno convencional	82
Figura 45 Muestras embolsadas y etiquetadas	82
Figura 46 Muestra a los 80 minutos.....	83
Figura 47 Muestra a los 100 minutos.....	83
Figura 48 Muestra a los 120 minutos.....	83
Figura 49 Muestra a los 150 minutos.....	83
Figura 50 Muestra a los 180 minutos.....	83
Figura 51 Muestra a los 300 minutos.....	83
Figura 52 Componentes generales del deshidratador asistido por bomba de calor	85
Figura 53 Medidas del equipo deshidratador asistido por bomba de calor	86
Figura 54 Modelo tridimensional del deshidratador asistido por bomba de calor	86

DEDICATORIAS

A mi esposa Arely Margarita Maldonado Pozos por su apoyo incondicional y velar por el avance de cada etapa de mis estudios de Posgrado.

A mis hermosos hijos Emilio Espinoza Maldonado y Regina Espinoza Maldonado ya que por el amor que les tengo son siempre una motivación de superación constante en la vida.

Felipe de Jesús

AGRADECIMIENTOS

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología** (CONACyT) por la beca otorgada con clave (CVU:1001246), con la cual fue posible la realización de mis estudios de Maestría.

A la **Universidad Autónoma Chapingo** (UACH) y al **Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua** (IAUIA), por brindarme la formación académica universitaria y de posgrado.

A mi director de tesis, el **Dr. Federico Félix Hahn Schlam** quien, con sus conocimientos y experiencia, guio y apoyó en el desarrollo de cada una de las etapas de la presente Tesis.

Al **Dr. Noé Velázquez López** y al **Dr. Pedro Cruz Meza** por sus conocimientos, disposición y experiencia brindados para desarrollar el presente trabajo.

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales

Nombre: Felipe de Jesús Espinoza Gutiérrez

Fecha de nacimiento: 5 de febrero de 1986

Lugar de nacimiento: Temascal, San Miguel Soyaltepec, Oaxaca

CURP: EIGF860205HOCSTL03

Profesión: Ingeniero Mecánico Agrícola

Cédula Profesional: 12571230

Desarrollo Académico

Bachillerato: Centro de Bachillerato Tecnológico Agropecuario No.16, San Bartolo Tuxtepec, Oaxaca (2003).

Licenciatura: Ingeniería Mecánica Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México (2009).

RESUMEN GENERAL

CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DE UN DESHIDRATADOR POR BOMBA DE CALOR

El proceso de secado de productos agrícolas es realizado, generalmente, con deshidratadores que operan con la quema de combustibles y resistencias eléctricas para generar el calor del proceso, en un ambiente abierto, comunicado permanentemente con la temperatura y humedad relativa del ambiente; estas características hacen que el deshidratado tarde más de 24 horas, según el producto a secar, presentando daño en sus características organolépticas y fisicoquímicas.

Por lo tanto, es necesario contar con un deshidratador que no sea afectado por la temperatura y humedad relativa del medio circundante y que sea capaz de deshidratar productos sin afectar sus características organolépticas principales (color, olor y sabor), aunado a un bajo consumo energético. Es aquí donde el desarrollo y construcción de un deshidratador por bomba de calor justifica su aplicación.

Se construyeron prototipos de deshidratador por bomba de calor, empleando componentes principales de un equipo frigorífico comercial de 1/4 HP (compresor, condensador, evaporador y válvula de expansión), dichos componentes se adecuaron para funcionar en un ambiente cerrado, con recirculación total del aire de deshidratado y operando con humedades relativas inferiores al 20% en el interior de la cámara de deshidratación, de igual forma se implementó un termostato electrónico, que permite controlar la temperatura de deshidratado y un variador de potencia para regular la velocidad del aire.

Adecuando los primeros prototipos y basando las mejoras en la teoría de los deshidratadores por bomba de calor, se obtuvo un equipo deshidratador vertical con 21 parrillas estáticas, que opera en un ambiente cerrado, con humedad relativa menor al 20%, temperatura controlada máxima de 55 °C y velocidad de recirculación del aire de 0.5 a 3.5 m/s. Con un consumo energético de 4.412 Kw/h por proceso de deshidratación de 5 horas y humedad relativa residual de 12% al deshidratar rodajas de manzana de 5 mm de espesor.

Palabras clave: deshidratador, bomba de calor, temperatura, humedad relativa, velocidad del aire.

GENERAL ABSTRACT

CONSTRUCTION AND FUNCTIONING TESTS OF A HEAT PUMP DEHYDRATOR

The drying process of agricultural products is generally carried out with dehydrators that operate with the burning of fuels and electric heaters to generate the heat of the process, in an open environment, permanently communicated with the temperature and relative humidity of the environment, these characteristics cause the dehydration to take more than 24 hours, depending on the product to be dried, presenting damage to its organoleptic and physicochemical characteristics.

Therefore, it is necessary to have a dehydrator that is not affected by the temperature and relative humidity of the surrounding environment and that is capable of dehydrating products without affecting their main organoleptic characteristics (color, smell and taste), together with low energy consumption. This is where the development and construction of a heat pump dehydrator justifies its application.

Prototypes of a heat pump dehydrator were built using the main components of a 1/4 HP commercial refrigeration equipment (compressor, condenser, evaporator and expansion valve). These components were adapted to work in a closed environment with total recirculation of the dehydration air and operating with relative humidity less than 20% inside the dehydration chamber, in the same way an electronic thermostat was implemented, which allows to control the dehydration temperature and a power variator to regulate the air speed.

By adapting the first prototypes and basing the improvements on the theory of heat pump dehydrators, a vertical dehydrator equipment with 21 static grates was obtained. The equipment operates in a closed environment with relative humidity less than 20%, a maximum controlled temperature of 55 ° C and air recirculation speed from 0.5 to 3.5 m / s; with an energy consumption of 4,412 kw/h by dehydration process of 5 hours and residual relative humidity of 12% when dehydrating apple slices 5 mm thick.

Keywords: dehydrator, heat pump, temperature, relative humidity, air speed.

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

La conservación de alimentos a través del secado es una de las técnicas más antiguas, pero al mismo tiempo es una práctica con altos costos de energía, pues se utiliza la quema de combustibles o energía eléctrica para la generación de calor. Según Mujumdar A.S. (2004) dice que entre el 10 y el 15% de la energía que se utiliza en la industria, se destina a operaciones de secado.

La mayoría de los alimentos agrícolas son comercializados en forma de conserva en diferentes partes del mundo, pues su tiempo de vida es mucho mayor a la que tienen en fresco, Gómez-Daza (2012) además que facilita su transportación y manejo en almacén, lo que no sería posible en alimentos frescos.

El proceso de secado se realiza mediante diferentes técnicas como el secado convectivo, secado con vacío o liofilización. Estos demandan alto consumo de energía. Sosle V. (2002)

Los equipos deshidratadores que utilizan bomba de calor, se han empleado en la industria alimenticia, para desecar alimentos agrícolas en diferentes partes del mundo, pues trabajan con un bajo consumo energético. Hernández (2017)

El presente proyecto tiene como objetivo principal desarrollar, construir y realizar pruebas de funcionamiento de un equipo deshidratador asistido con bomba de calor y emplearlo para deshidratar diferentes productos agrícolas, así mismo controlar y monitorear la temperatura de deshidratado por medio de un termostato electrónico, controlar y monitorear la velocidad del flujo de aire de deshidratado, monitorear y minimizar la humedad relativa en la cámara de deshidratación, evaluar el funcionamiento del equipo deshidratador y realizar ajustes necesarios para lograr la máxima eficiencia en el proceso de deshidratación.

Para desarrollar el presente proyecto, se realizó revisión bibliográfica amplia de los temas de deshidratación, bombas de calor y sus componentes, los factores que influyen en la eficiencia del proceso de deshidratación, deshidratadores comerciales por bomba de calor, deshidratadores solares planos, entre otros.

Parte del desarrollo del proyecto fue proyectado para ser realizado en las instalaciones de la Universidad Autónoma Chapingo, principalmente en los talleres de diseño-manufactura y laboratorios de pruebas. De igual manera, se tomó un curso académico especializado en bomba de calor en los laboratorios de termodinámica del departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola de la UACH y curso de sensores y controles en el posgrado de MIAUIA con lo cual se obtuvieron fundamentos importantes para el desarrollo del prototipo de bomba de calor. Las pruebas de funcionamiento del equipo deshidratador por bomba de calor se llevaron a cabo dentro del municipio de Texcoco. Edo. De México.

En la primera fase del proyecto se realizó el diseño conceptual del prototipo vertical de deshidratador asistido por bomba de calor, seguido de sus planos en Solid Works y se realizaron los ajustes técnicos necesarios, con fines de poder implementar componentes comerciales empleados en sistemas de refrigeración.

En la segunda fase del proyecto, se construyó el prototipo de bomba de calor, para lo cual se emplearon componentes comerciales como el compresor, sensores y ventiladores; en tanto el circuito eléctrico de control e intercambiadores de calor fueron desarrollados a medida de los requerimientos del prototipo. Se le realizaron las pruebas y ajustes necesarios a la bomba de calor para obtener la mayor eficiencia posible de funcionamiento.

En la última etapa de desarrollo del proyecto se realizaron pruebas de funcionamiento del equipo deshidratador por bomba de calor y se llevaron a cabo los ajustes necesarios para maximizar la eficiencia del equipo en la deshidratación de rodajas de manzana variedad Golden, con un espesor de 5 ms.

El rango de temperatura de deshidratación se fluctuó entre 40 a 60°C.

Con lo anterior se obtuvo un equipo deshidratador asistido con bomba de calor plenamente funcional y eficiente en términos energéticos, económicos y operativos.

1.1 Referencias

Mujumdar AS. Research and development in drying: recent trends and future prospects. Dry Technol. 2004; 22 (1-2): 1-26

Gómez-Daza, Juan C., &Ochoa-Martínez, Claudia I. (2012). Secador asistido por bomba de calor y secador convectivo con recirculación total: Alternativas para el secado de materiales agroalimentarios. Vitae, 19(1), s36-s38.

Sosle V. A heat pump dehumidifier assisted dryer for agri-foods[dissertation]. [Ontario, Canada]: McGill University: 2002. 140p.

Hernández Rodríguez, José, & Quinto Diez, Pedro, & Barbosa Pool, Glicerio R, & Aguilar Aguilar, Jorge O (2017). Secado Solar de Frutas y Verduras en Quintana Roo, México. Revista Iberoamericana de Tecnología Poscosecha, 18(1) ,1-8.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Conservación de alimentos

La conservación de alimentos es un proceso que utilizaron por primera vez las antiguas culturas agrícolas, hace miles de años. Dicho proceso consistía en la desecación o congelación de los alimentos, lo que permitía la supervivencia humana durante los periodos de sequía o en los largos inviernos gélidos.

Con el paso del tiempo la conservación de alimentos se fue modificando pasando de utilizar técnicas rudimentarias que tenían como elemento principal el aire, el sol, el fuego, el hielo, o la salación, a pasar a técnicas más sofisticadas, como la conservación al vacío o los conservadores químicos agregados a los alimentos.

En la actualidad países de primer mundo están retomando técnicas de conservación caseras y artesanales Yong et al. (2017), que buscan minimizar la degradación y la contaminación del ambiente, y al mismo tiempo, hacer que estas técnicas no alteren las propiedades nutrimentales de los alimentos. En estos procedimientos, los alimentos son sometidos a diferentes procesos, buscando que conserven su calidad y maximizando las condiciones sanitarias. Díaz et al. (2005)

El secado se ha utilizado como un método de conservación, en la industria alimenticia; el objetivo principal de cualquier proceso de secado es obtener un producto seco, de calidad deseada un costo mínimo y rendimiento máximo, optimizando el diseño y las condiciones de operación de los equipos empleados para el secado de productos. Sun L. (2005)

El secado de alimentos, es considerado una excelente opción para procesar y conservar los productos agrícolas de forma higiénica y cumpliendo con los estándares de calidad y normas correspondientes; al mismo tiempo reduciendo el consumo de combustibles tradicionales, mejorar la calidad de los productos y cuidar el medio ambiente. Hernández et al. (2021)

Esta operación intensiva demanda energía que consume entre el 9 y el 25% de la energía nacional en los países desarrollados. Por lo tanto, para reducir la energía consumida por unidad de humedad del producto, es necesario examinar diferentes metodologías de secado, así como diferentes equipos de secado en función de la operación específica y finalidad del proceso de secado de productos. Chua K.J. (2001)

Las operaciones de secado son muy diversas, su diferencia principal es la metodología que se utiliza en el proceso, siendo el fin común la eliminación de la humedad contenida en los productos a deshidratar y las variantes de dichos métodos están dadas principalmente por el manejo del producto a deshidratar, el medio deshidratante, el tipo de energía empleada en el proceso y las condiciones controlables del mismo.

Los primeros registros del uso de secadores por bomba de calor (SBC) datan de 1973, realizándose los primeros estudios en 1976. Los deshidratadores asistidos por bomba de calor, son empleados desde ese entonces por la industria alimenticia para el secado de productos agrícolas en diferentes países. Colak N. (2009)

Como lo mencionan Gómez y Ochoa (2012), para deshidratar alimentos, el secado asistido por bomba de calor con recirculación total del aire, resulta el método más eficaz, comparado con métodos de secado solares y deshidratadoras convectivas, pues en estudios anteriores, se ha demostrado su efectividad, bajo consumo energético y que mantiene las propiedades físicas y químicas de los alimentos.

2.2 Importancia del deshidratado de alimentos

El proceso de secado es uno de los métodos más antiguos utilizados para la conservación de alimentos. Monsalve y Machado (2007). Durante la Edad de Hierro, al norte de Europa, comienzan a experimentar con la deshidratación, construyeron los primeros hornos para secar trigo recién cosechado, pues así el alimento se conservaba por más tiempo.

El objetivo central de este tipo de conservación es reducir la humedad de los alimentos, para lograr periodos más largos de almacenamiento King (1974). El agua juega un papel muy importante en la composición de los alimentos, ya que forma la mayor parte de los mismos y es vital para la conservación de la frescura color y aroma de éstos; de igual manera el agua en los alimentos determina la actividad microbiana y fisicoquímica que son los principales elementos que conducen a la descomposición de los productos.

Dentro de los principales métodos para deshidratar un producto tenemos: secado solar, Convección por aire caliente, microondas, liofilización, pulverización, deshidratación osmótica, entre otros. Vega, A. (2006)

Así como lo menciona Marín et al. (2006), es imperativo el estudio de los fenómenos de transferencia de materia y energía que se dan en el proceso de deshidratado, al igual que los cambios que se dan en el producto a nivel de su estructura (microporosidad, firmeza, reducción de volumen y densidad) y las reacciones bioquímicas como la oxidación enzimática y no enzimática principalmente.

Comercialmente, una ventaja distintiva de la deshidratación de los alimentos es la reducción de costos de transportación y almacenaje, además se añade un valor agregado a los alimentos. Toledo (1994)

Los alimentos deshidratados se utilizan directamente para consumo cuando hay escasez en la región, pero actualmente se utilizan como materia prima para elaborar otros alimentos y bocadillos. Marín et al. (2006) Los productos deshidratados son fuente de proteínas, vitaminas, minerales, fibra dietética y antioxidantes. Vega (2006)

En la actualidad la industria de alimentos deshidratados forma parte esencial de la economía mundial. Es por ello, que el uso de equipos industriales automatizados para la deshidratación, tiene significativas ventajas con respecto

al secado solar, algunas de estas ventajas se manifiestan en el tiempo de secado e higiene del producto deshidratado.

También la calidad de los productos se ve menos afectada, ya que se obtienen productos más homogéneos, dándole un valor agregado al alimento; los productos se contaminan menos ya que se desecan en cámaras cerradas y herméticas, donde la presencia de los microorganismos es casi nula. Dentro de dichas cámaras es más factible el control de variables como la temperatura, velocidad del aire de secado, Humedad relativa, etc.). Vega, et al. (2006) Que las hace más dinámicas y se adaptan al clima del medio circundante.

Dentro de las ventajas de consumir alimentos deshidratados está que existen estudios que demuestran que el consumo frecuente de frutos secos ayuda a reducir el riesgo de padecimientos cardiovasculares Fraser et al., (1992); Sabaté (1999). Por lo tanto, los frutos secos son alimentos de gran valor nutricional, debido a que aportan una extensa variedad de sustancias beneficiosas (minerales, fibra, vitaminas, etc.).

2.3 Deshidratadores solares

Los deshidratadores solares son equipos en donde se hace uso de la radiación del sol para calentar el aire, al mismo tiempo que se elimina el agua de los tejidos de productos agrícolas (frutas, verduras, semillas y hierbas, etc.) y de otros productos como carne o madera. Una vez deshidratados, el tiempo de conservación en seco puede variar de 6 meses, hasta dos años, sin perder sus propiedades nutritivas, fisicoquímicas y organolépticas. Mustayen (2014)

Los deshidratadores solares están compuestos principalmente por una unidad colectora de radiación solar por donde ingresa el aire de deshidratado y una cámara donde se colocan los productos a deshidratar. Espinoza (2016) La energía llega del sol como radiación, las paredes del colector se calientan por conducción. El aire fresco que entra se calienta, y circula hacia el área de secado por un proceso de convección. El agua contenida en los productos se evapora y sale por la parte superior del área de secado. Finalmente, el aire

cargado de humedad sale por el área de evacuación y se disipa en el ambiente. El proceso constante de convección conlleva al secado de los frutos en lapsos que dependen de las condiciones climáticas y micro climáticas del día y el sitio donde se encuentre funcionando el deshidratador. Pérez y Martínez (2010)

En la ilustración 1, se muestra el principio de funcionamiento del secado solar indirecto.

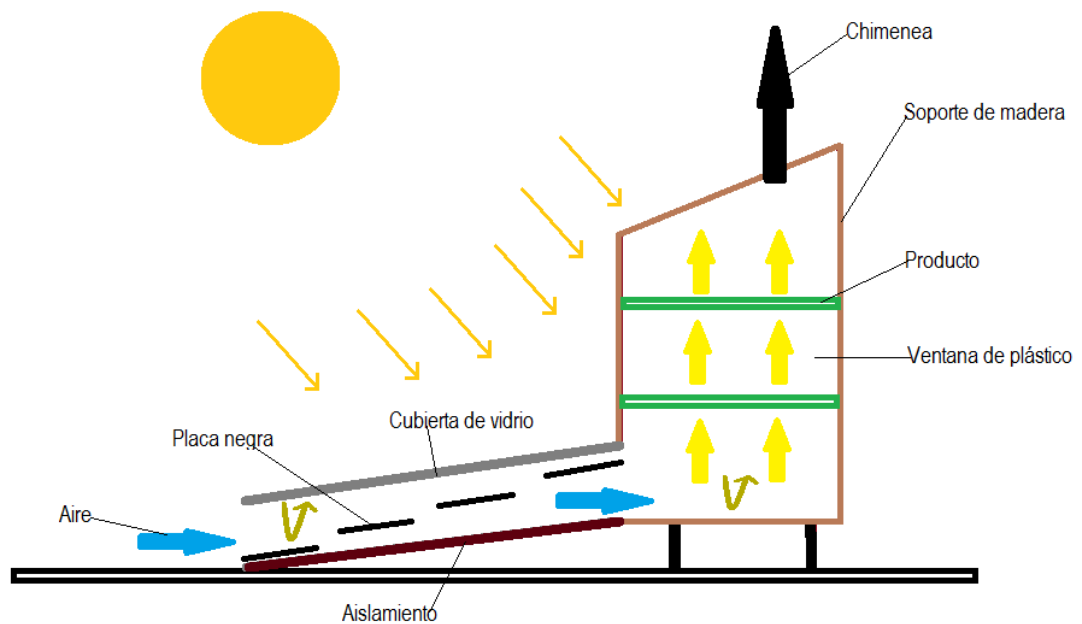


Figura 1 Diagrama de un secador solar

El deshidratado de alimentos por medio de secadores solares, es una alternativa renovable que muchas industrias utilizan en la actualidad. Así mismo es un mecanismo de desarrollo económico para pequeños productores hortofrutícolas.

2.4 Deshidratadoras convectivas

En las deshidratadoras convectivas, el proceso de deshidratación es dado por el movimiento convectivo que tiene el aire caliente de deshidratado que entra en contacto con el producto, absorbiendo la humedad del mismo y la retira de la

cámara de secado. Algunos ejemplos de los gases calientes son: aire, gases inertes, vapor de agua, entre otros.

En los deshidratadores que operan por convección, el consumo de energía es más alto a medida que se requiere menor humedad residual en el producto. Estos deshidratadores pueden ser continuos o intermitentes, con base a su capacidad de producción y al tipo de producto a deshidratar. Fito et al. (2001)

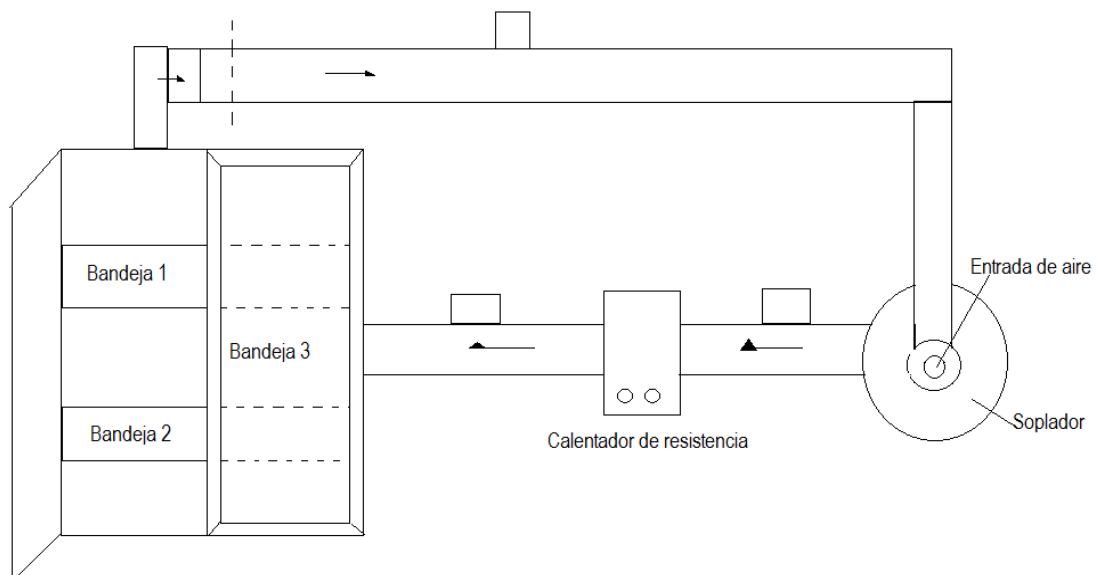


Figura 2 Diagrama de una secadora convectiva

2.5 Deshidratadoras por bomba de calor

En el secado por bomba de calor hay una ventaja distintiva de entre los otros secadores de productos: una bomba de calor tiene la capacidad de recuperar el calor latente y sensible al condensar la humedad del aire de secado, lo que otros métodos de secado no pueden hacer.

El calor que se genera, se recircula de vuelta al secador mediante el calentamiento del aire de secado deshumidificado; por lo tanto, la eficiencia energética se incrementa significativamente como resultado de la recuperación de calor recirculado, que de otro modo se perdería en la atmósfera usando otros secadores convencionales.

Esto permite que el secado se logre a temperaturas más bajas, haciendo que algunos productos no cambien sus propiedades físicas, también este sistema representa un menor costo de operación, incluso cuando las condiciones ambientales son más húmedas.

A continuación se muestra una comparación de las eficiencias y ventajas de los secadores con bomba de calor sobre los secadores de vacío y de aire caliente.

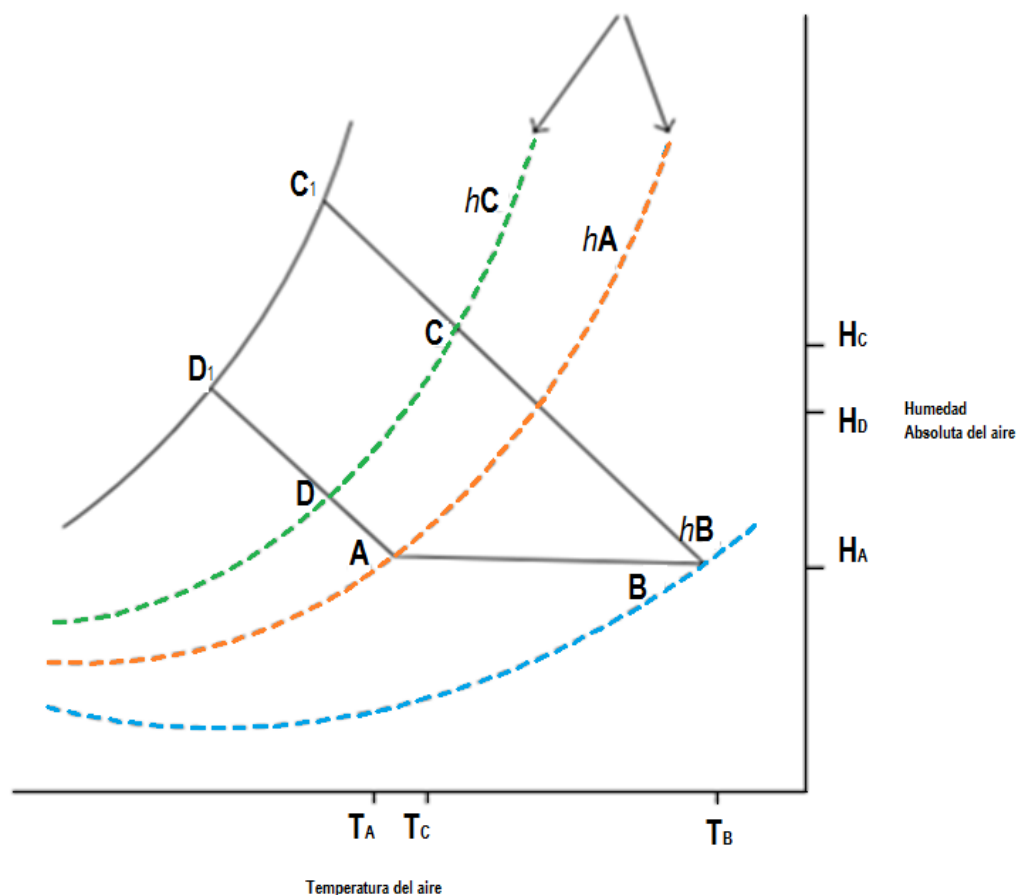
Cuadro 1 Comparación de un deshidratador por bomba de calor con otros deshidratadores

Item	HPD drying	Hot air drying	Vacumm drying	Freeze drying
SMER (kg/kwh)	1.0 - 4.0	0.1 – 1.3	0.7 – 1.2	0.4 and lower
Operating temperature range (°C)	-10 to 80	40 to very high	30 – 60	-35 to >50
Operating % RH range	10 – 80	Varies depending on temperature	Low	Low
Drying efficiency (%)	Up to 95	35 - 40	Up to 70	Very low
Drying rate	Faster	Average	Very slow	Very slow
Capital cost	Moderate	Low	High	Very high
Running cost	Low	High	Very high	Very high
Control	Very good	Moderate	Good	Good

Fuente: Mujumdar (2004)

Según la FAO, la capacidad del aire para eliminar la humedad depende de su temperatura y humedad inicial. La humedad relativa del aire debe controlarse para que no dependa de la humedad absoluta del ambiente y de la temperatura de secado. Los cambios en las condiciones del aire cuando el aire se calienta y pasa a través de un lecho de producto húmedo se muestran en la siguiente figura.

Representación psicrométrica de un sistema de secadora de aire convencional



Fuente: FAO (2006)

Figura 3 Representación psicrométrica del sistema de secado por aire convencional

El paso de la temperatura del aire T_A hasta T_B , está expresado con la línea AB. En este proceso, la humedad absoluta es constante, en esta etapa, la humedad relativa decrece de h_A a h_B . Esta baja humedad relativa elimina la humedad de los materiales. A medida que el aire se mueve a través del lecho de material, absorbe la humedad.

En el secado por gas, el calor sensible del medio deshidratante pasa a calor latente y la variación de las condiciones de dicho medio es expresada por la línea de entalpía constante, BC. El medio aumentará su humedad absoluta HC

y humedad relativa h_C , pero decrecerá la temperatura T_C . La absorción de humedad por el medio deshidratante está dada por la diferencia de humedades C y B , es decir, H_C menos H_A . Si el aire que no ha sido calentado pasa a través del lecho, el proceso de deshidratado estaría expresado en la línea $A-D$.

Si se tuviera la condición que el aire en el punto D compartiera la misma humedad relativa que se tiene en h_C , así como el aire en C , la humedad retirada del producto estaría expresada por H_D menos H_A y sería considerablemente menos que la humedad absorbida por el medio deshidratante H_C menos H_A .

En la etapa final de secado, habrá poca diferencia de las relaciones de humedad en la entrada y salida de la cámara de secado. La diferencia de temperatura correspondiente también será mínima y dará como resultado un secado ineficaz y una baja eficiencia térmica. FAO (2006)

Cuando se utiliza un equipo deshidratador por bomba de calor, resulta más fácil controlar la humedad y la temperatura del aire, así como la recuperación del calor. Por lo anterior se obtienen productos de mejor calidad, conservando sus propiedades físicas y químicas y se hace un uso eficiente de energía.

La disposición de los componentes de un proceso típico de secado con bomba de calor se muestra en la siguiente Figura:

Disposición de los componentes de un secador por bomba de calor

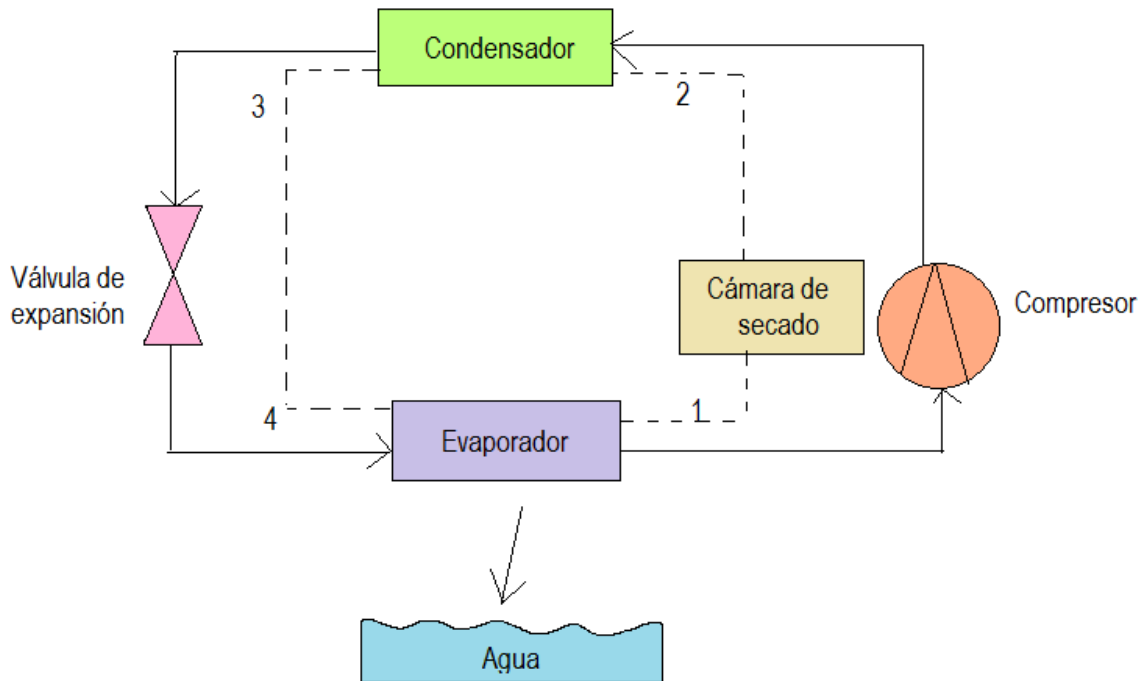


Figura 4 Disposición de los componentes de un secador con bomba de calor

La figura muestra que el aire de secado se deshumidifica en el evaporador y se vuelve a calentar a la temperatura deseada en el condensador antes de su paso adicional a través del material, ofreciendo así una ventaja de mejor tasa de secado y calidad del producto que el secado convencional.

2.5.1 Diferentes formas de aplicación del secado con bomba de calor

Existen diferentes formas de aplicación del secado con bomba de calor. Según Mujumdar, A.S. (2007), estas formas incluyen variar lo siguiente: modo de operación, ciclo de la bomba de calor, medios de secado, calefacción suplementaria, operación del secador con bomba de calor, número de etapas de la bomba de calor y temperatura para el secado.

Una mejora que la bomba de calor tiene sobre otras fuentes de calor para el secado es que se puede aplicar a cualquier tipo de secadoras. Cualquier secadora que utilice la convección como función principal de entrada de calor, podría equiparse con una bomba de calor diseñada adecuadamente, pero las

secadoras que requieren grandes cantidades de aire de secado, por ejemplo, secadoras de vapor o flash, no son adecuadas para la operación de bomba de calor.

La tecnología de secado con bomba de calor se ha combinado con otras técnicas de secado para minimizar algunos problemas encontrados en esas técnicas y que al mismo tiempo se logre una mejor calidad del producto. Entre las ventajas que se han encontrado en su uso, están las siguientes:

- Menor consumo de energía
- Alto coeficiente de rendimiento
- Alta eficiencia térmica

Los ejemplos de secado asistido por bomba de calor incluyen secado solar asistido por bomba de calor, secado por microondas, secado por infrarrojos, secado por lecho fluidizado, liofilización atmosférica, secado por radiofrecuencia y secado asistido por bomba de calor química. Zhang (2004)

Este tipo de secado es útil con materiales sensibles al calor como frutas, verduras, semillas, carnes, etc. que solo necesitan baja temperatura. Por ejemplo, la combinación de una bomba de calor con un secador solar mejora el proceso de deshidratado y reduce los costos.

Una bomba de calor resulta interesante porque se puede obtener más energía calorífica, que la energía que consume, ésta puede ser: eléctrica o de quema de combustibles. También este sistema se centra en el uso de ambientes controlados y cerrados que secan los materiales sensibles como los productos agrícolas.

Otra ventaja de un equipo deshidratador con bomba de calor, es que ésta se puede acondicionar al equipo, en disposición, forma y tamaño, mejorando en gran medida el rendimiento del secador. También el diseño de una bomba de calor, tiene la ventaja de tener un funcionamiento continuo, lo que permite condiciones de funcionamiento óptimas y estables.

2.5.2 Cuantificación de rendimientos durante el secado con bomba de calor

Un secador por bomba de calor, aporta las siguientes ventajas y características en productos agrícolas secados.

2.4.2.1 Calidad

Una de las características tecnológicas de un secador con bomba de calor, es que se pueden monitorear y controlar diferentes variables como la temperatura, la humedad y el tiempo de secado. Este sistema puede operar a una humedad absoluta menor que la del ambiente, tiene la capacidad de adecuar una temperatura de secado menor o mayor que la temperatura ambiental y la capacidad de secar en una cámara sin ventilación utilizando una atmósfera de secado modificada, hermética y aislada del ambiente.

Por lo tanto la calidad de los productos deshidratados, se ve mejorada por el secado con bomba de calor, conservando una serie de características físicas, químicas y sensoriales, algunas de las cuales se analizan a continuación:

2.4.2.2 Seguridad microbiana

La presencia de microorganismos en los productos agrícolas hace que la calidad de los productos deshidratados se vea afectada, lo que reduce también su vida de almacenamiento y deterioran la calidad. Con el secado de los alimentos, se minimizan o nulifican los daños microbianos a estos productos. Con el uso de la secadora con bomba de calor, la seguridad microbiana se incrementa significativamente al garantizar que las materias primas cumplan con los estándares mínimos de preparación.

La cantidad de agua presente en un alimento hace que los microorganismos crezcan y se desarrollen rápidamente. En la siguiente tabla, se muestra la cantidad de agua presente en algunos alimentos. Este valor oscila entre 0.0 a 1.0.

Cuadro 2 Agua en algunos alimentos

Productos Alimenticios	Valor de agua
Pescados, frutas, leche y hortalizas.	< 0.98
Leche, extractos de tomate, cárnicos.	0.93 – 0.98
Embutidos, quesos y jamones.	0.85 – 0.93
Harinas, cereales, frutos secos.	0.60 – 0.85
Papas, frituras, leche en polvo	< 60
Fuente: Carrillo y Reyes (2013)	

Los secadores con bomba de calor pueden mejorar la seguridad microbiana en los productos deshidratados, al conservar una humedad relativa en un nivel bajo aceptable. Además, la temperatura en la que funcionan los secadores con bomba de calor no está restringida por la humedad ambiental.

2.4.2.3 Color

La degradación del color es una causa importante de pérdida en el secado de alimentos. El color de los alimentos es importante para su aceptabilidad. Aunque los agentes surfactantes inhiben las reacciones de pardeamiento enzimático y no enzimático, su uso está rodeado de problemas de salud y seguridad.

Mujumdar (2007) observó la necesidad de reducir la temperatura de secado hacia el final del ciclo de secado para evitar el pardeamiento enzimático y no enzimático. En los secadores asistidos por bomba de calor, resulta relevante porque así como se puede controlar la humedad, también se puede controlar la temperatura de un producto. Al controlar la temperatura, el cambio de color es minimizado y los productos, no cambian drásticamente en su apariencia física.

También se ha estudiado que el deshidratado de frutas bajo nitrógeno resulta práctico para inhibir el cambio de color durante el período crítico inicial de secado, cuando la humedad relativa del producto está en niveles altos.

Al mismo tiempo que las frutas y verduras y otros productos agrícolas conservan sus características físicas como el color, se mantiene la calidad de los productos al usar secadoras por bomba de calor. Otra forma de lograr un

color no enzimático en el plátano y otras frutas es usando un secador con bomba de calor con variables que se pueden monitorear y controlar como la temperatura y humedad.

2.4.2.4 Pérdida de aroma y sabor

Algunas de las principales variaciones que se pueden dar con respecto al producto fresco y al deshidratado están dadas en el aroma y sabor; así como el color y la textura. Nijhuis (1998).

Los métodos de deshidratado que emplean temperaturas bajas, en el proceso de secado de productos agrícolas, ofrecen una alta concentración de compuestos aromáticos. Así mismo, los niveles de sabor varían en menor cantidad.

2.4.2.5 Viabilidad

La deshidratación, por medio de secadores asistidos por bomba de calor permite aumentar el tiempo de utilización de los productos de una manera eficiente y minimizar las pérdidas poscosecha en el campo, optimizando tanto la tecnología como la materia prima utilizada. Muñiz, et al. (2013)

En los alimentos deshidratados se pueden presentar pérdidas de vitaminas, minerales y nutrientes de los productos agrícolas, esto dependerá del tipo de proceso de deshidratación empleado y del manejo y tratamiento del producto a deshidratar. Melo (2018)

El secado por bomba de calor mejora las condiciones de calidad aumentando su viabilidad en almacén. Las pérdidas de vitaminas son mayores cuando el secado se realiza con otro tipo de secadores, ya que el control de la temperatura, y la humedad relativa no es manejable.

2.4.2.6 Rehidratación

La rehidratación no es meramente el proceso contrario a la deshidratación ya que se manejan diferentes formas de transferencia de materia y energía. Marín, B. (2006)

Durante el deshidratado por bomba de calor, se pueden observar cambios significativos en las propiedades físicas de las frutas y verduras a medida que se elimina el agua de los productos agrícolas. La rehidratación es un proceso de humectación de alimentos secos. Ochoa, L. et al. (2011)

El proceso de la rehidratación consiste en lo siguiente: en la mayoría de los casos, los alimentos deshidratados se sumergen en agua antes de consumirlos, por lo tanto, la rehidratación es un criterio muy importante. Sanjuán, N. (2001)

Los factores que afectan el proceso de rehidratación incluyen porosidad, capilaridad y cavidad cerca de la superficie del alimento, temperatura, burbujas de aire atrapadas, estado amorfo-cristalino, sólidos solubles, aniones, pH del agua de remojo y nivel de sequedad. Marín, B. (2006)

2.6 Ciclo de refrigeración

El ciclo de refrigeración se conforma de cuatro etapas. En la primera etapa, se presenta la entrada de un fluido evaporador, como hidrocarburos, mezclas azeotrópicas, sustancias orgánicas no saturadas y refrigerantes; en esta etapa el fluido refrigerante se encuentra en un estado de líquido-vapor saturado. Villamil, et al. (2005)

Posteriormente, pasa a la etapa 2 a través del evaporador, el cual transforma el fluido a vapor saturado (al evaporarlo). Después sube por un conducto isentrópico, mediante el cual pasa por el compresor, es ahí donde se eleva la presión y la temperatura de la sustancia que se convierte en vapor saturado.

En la etapa 3, la sustancia se encuentra a presión y temperaturas muy altas. Y en la etapa 4 se pasa por el condensador, en donde se baja la temperatura del fluido drásticamente y se lleva a líquido saturado, pasando por una válvula de estrangulamiento, la cual llevará al fluido a la temperatura y presión y se iniciará el ciclo nuevamente. Este ciclo se puede ver mejorado con un aumento de eficiencia en el refrigerante, al bajar verticalmente la línea del líquido saturado. Aquí se muestra un diagrama del ciclo de refrigeración con las cuatro etapas descritas anteriormente.

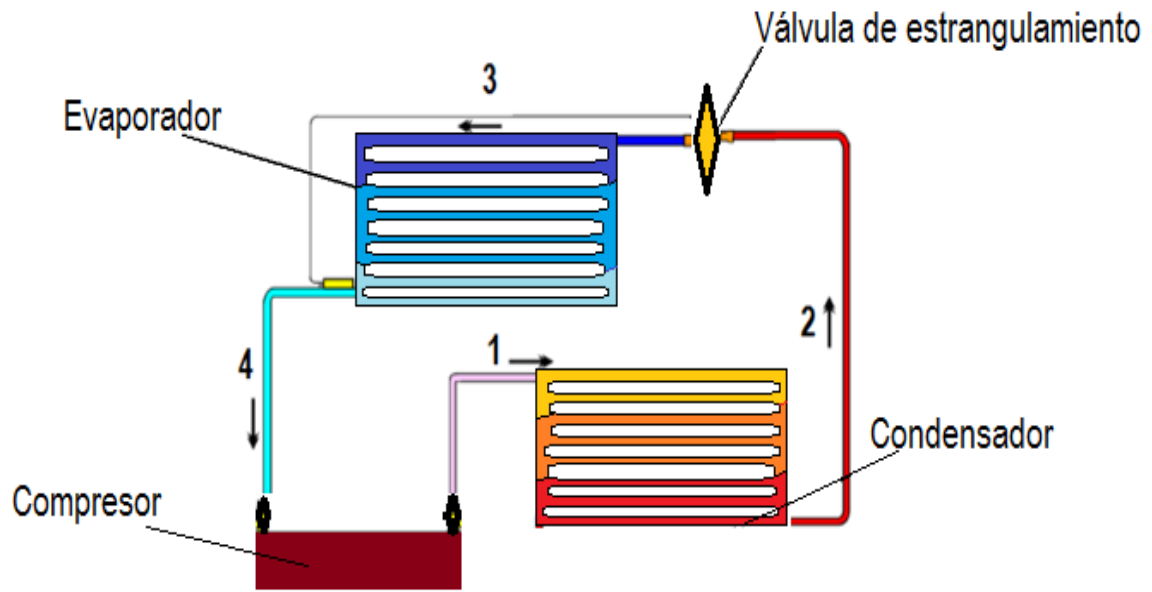


Figura 5 Diagrama del ciclo de refrigeración

En este proceso podemos utilizar diferentes instrumentos de control de flujo del refrigerante, en el diagrama anterior, se observa una válvula de estrangulamiento, la cual controla la alimentación del refrigerante líquido a la entrada del evaporador.

Al pasar el refrigerante por el evaporador se presenta absorción de calor que hace que el refrigerante se evapore.

La válvula de estrangulamiento es la encargada de regular el paso del líquido a través del evaporador. Al salir el refrigerante en estado semi gaseoso del evaporador viaja a través de la línea de succión conectada al compresor.

El compresor recibe el refrigerante a baja presión y lo comprime aumentando la presión y temperatura del gas y éste último es conducido hacia el condensador donde se lleva a cabo en proceso de enfriamiento de dicho gas a alta presión induciendo la condensación del mismo.

2.7 Ciclo de compresión

El ciclo de compresión está determinado principalmente por el trabajo que realiza el compresor para reducir el volumen del gas, de igual manera se le agrega calor al gas debido al trabajo del compresor (calor de compresión). Yañez, (2021). El calor de rechazo es el que se retira del sistema en el condensador.

2.8 Bomba de calor

El funcionamiento de la bomba de calor se muestra en la Figura 6, este ciclo es muy parecido al ciclo de refrigeración anteriormente descrita. El uso de bombas de calor se remota hacia los años 70's en Europa y Norte América. En los últimos treinta años, las aplicaciones de bombas de calor se han visto limitadas por términos económicos. Strumitto, C. (2006)

En la figura siguiente se muestra el diagrama de flujo de una bomba de calor y se detalla su funcionamiento.

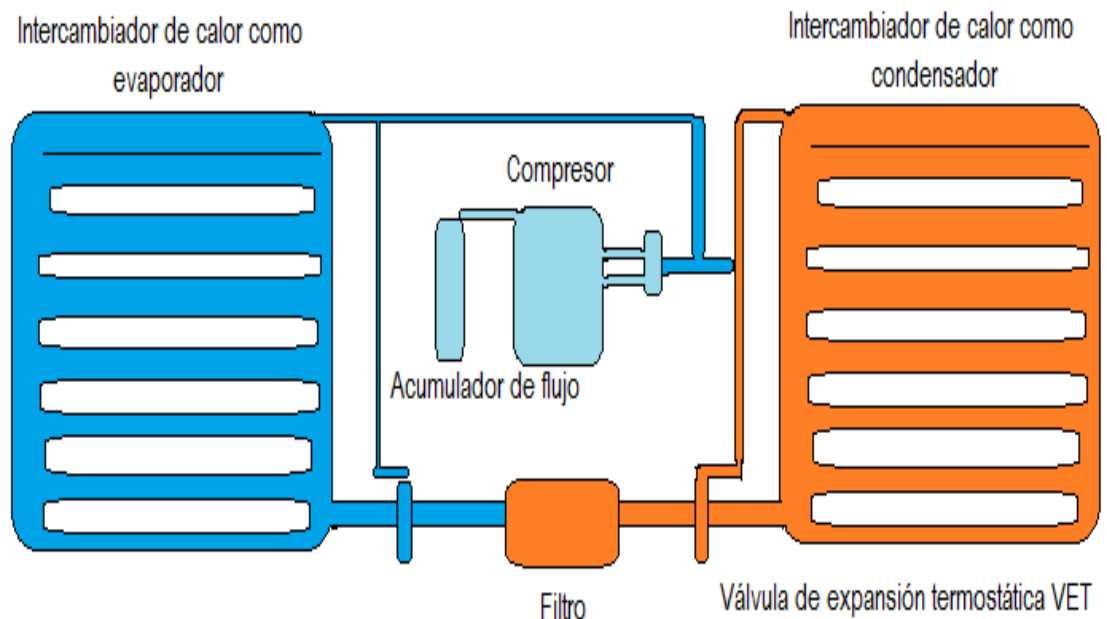


Figura 6 Diagrama de funcionamiento de bomba de calor

El compresor que se encuentra al centro del diagrama, transporta el calor absorbido en el evaporador y lo dirige hacia el condensador, posteriormente se comunica con el condensador y se regula mediante las válvulas de expansión.

Al mismo tiempo, el calor que es absorbido en el evaporador enfría el contenido de la bomba hasta la carga térmica fría.

En el deshidratado de alimentos y productos agrícolas, es necesario desecarlos a bajas temperaturas (entre 30 y 50°C) y controlando la humedad relativa. Por ejemplo en las hierbas aromáticas y raíces como el jengibre, el valor comercial y el valor medicinal que se le agrega es alto. Adapa (2002)

El deshidratado con temperaturas muy elevadas, deteriora física y químicamente los productos agrícolas y al mismo tiempo afecta la estructura del material y puede volverlo inadecuado para su uso posterior. Por otra parte, el secado con bajas temperaturas reduce significativamente la pérdida en el contenido de nutrientes y minimiza el daño a las propiedades físicas de los productos. Por lo anterior el secado por bomba de calor resulta la mejor opción sobre otros deshidratadores.

2.7.1 Componentes de la bomba de calor

Los componentes principales son:

Compresor se considera el elemento más importante del equipo, su función consiste en aumentar la presión del refrigerante que se encuentra en estado gaseoso, mismo que procede del evaporador y lo conduce hasta una presión que transforme el gas a líquido.

Los compresores según su ubicación, pueden ser herméticos, semi herméticos o abiertos, este recibe el gas refrigerante que sale del evaporador, ahí el vapor se encuentra a baja presión y temperatura y se transporta por la tubería de aspiración. Ahí lo comprime aumentando su presión y temperatura, expulsándolo por la tubería de descarga hacia el condensador.

La compresión de cualquier gas, requiere energía mecánica que representa un consumo energético.

Condensador El refrigerante que se encuentra en forma de gas muy caliente, se "condensa" pasando al estado líquido. El calor es cedido al medio exterior ya sea por una bomba de calor o una deshumidificadora. La válvula de expansión controla y dosifica la alimentación del refrigerante al evaporador con condiciones de temperatura y de presión idóneas, de modo que sea aprovechado en su totalidad.

Evaporador Es en este componente donde ingresa el refrigerante en estado líquido, a baja presión y a baja temperatura; mediante la absorción de calor del medio circundante se realiza la evaporación del líquido refrigerante.

En el caso de bombas de calor reversibles, la válvula Inversora o de expansión, invierte el sentido del ciclo frigorífico, a manera tal que el intercambiador que funciona como evaporador en el ciclo descrito, pasa a funcionar como condensador y el intercambiador que actúa como condensador, ahora funciona como evaporador. Esto hace que las Bombas de Calor reversibles dispongan de una función especial que no dispone ninguna otra tecnología de climatización; para la inversión del funcionamiento, en el mismo equipo se puede producir calefacción o refrigeración, simplemente activando el ciclo deseado.

2.9 Deshidratadora Convectiva por Bomba de Calor

Los equipos deshidratadores asistidos por bomba de calor son energéticamente cerrados, prácticamente herméticos y, por lo tanto, a diferencia de dispositivos de secado convencionales, expulsan agua fuera del sistema de forma líquida, manteniéndola fuera del sistema, haciendo que solo circule aire caliente cada vez más seco, esta agua que es expulsada puede ser almacenada en un depósito y es propensa de ser aprovechada.

Por otro lado, los deshidratadores por bomba de calor, se vuelven sistemas complejos debido a la interdependencia de sus componentes y a los parámetros

de termodinámica; cualquier cambio que ocurra en un componente o parámetro involucrará un cambio significativo en todo el sistema.

Las principales ventajas de los sistemas de secado asistidos por bomba de calor son los siguientes:

1. Control de humedad relativa del aire de secado, y control de temperaturas de bulbo seco y húmedo.
2. Permite una alta eficiencia energética debido a la baja temperatura de deshidratado.
3. Se obtiene un producto de alta calidad al final del proceso, debido a las características antes mencionadas
4. Reduce el costo de energía, lo que lo hace un sistema ecológicamente amigable.

En comparación con los secadores convectivos de aire caliente, ampliamente utilizados, las limitaciones de los deshidratadores asistidos por bomba de calor significarán una mayor inversión y costos de mantenimiento elevados, ya que sus operaciones son más complejas y esto hace que el mantenimiento sea llevado a cabo por ingenieros y técnicos calificados. New Innovative Concepts (2005)

Las secadoras con bomba de calor efectúan su trabajo dentro de un ciclo cerrado permitiendo que se reutilice la totalidad del aire y parte del calor utilizado en el sistema. Esto permite tener una alta eficiencia energética y practicidad de funcionamiento al no requerir tubería para transportar aire al exterior.

El aire se calienta con el condensador de la bomba de calor y se lleva a la cámara de secado y ya que sale de ésta, el aire sale aún caliente y húmedo. Seguido, el aire pasa por el evaporador (del ciclo de refrigeración) que le quita la humedad mediante condensación al entrar en contacto con la baja

temperatura del evaporador, el agua condensada cae a un depósito donde se puede almacenar o desechar de inmediato.

Seguido, el aire seco y fresco se dirige nuevamente hacia el condensador para ser calentado e iniciar el ciclo. Además, la eficiencia energética de estas secadoras es mejor debido a que necesitan menos watts para funcionar. Los pasos de su funcionamiento pueden enumerarse de la siguiente manera:

Mediante un ventilador-soplador el aire circula por el interior de la secadora. Este aire pasa por un calentador (condensador del ciclo de refrigeración). El aire caliente pasa al interior de la secadora. (Absorbiendo humedad del producto a secar). Tras ello, el aire está caliente y húmedo, ya que contiene el vapor de agua que evaporó y absorbió de los cuerpos que se están deshidratando. Ahora, el aire pasa al evaporador (del ciclo de refrigeración), donde se enfría. El vapor de agua se condensa y el aire se seca. El aire frío y seco sale del evaporador. Este aire regresa al condensador (del ciclo de refrigeración) donde se calienta, de manera que es reutilizado y así reinicia el ciclo.

El factor determinante de este tipo de deshidratadores está dado por la capacidad de trasladar el calor de una zona a otra para aprovecharlo al máximo, de esta forma existe una optimización de la energía empleada en el proceso.

Se muestra a continuación un diagrama del ciclo de deshidratadoras por bomba de calor.

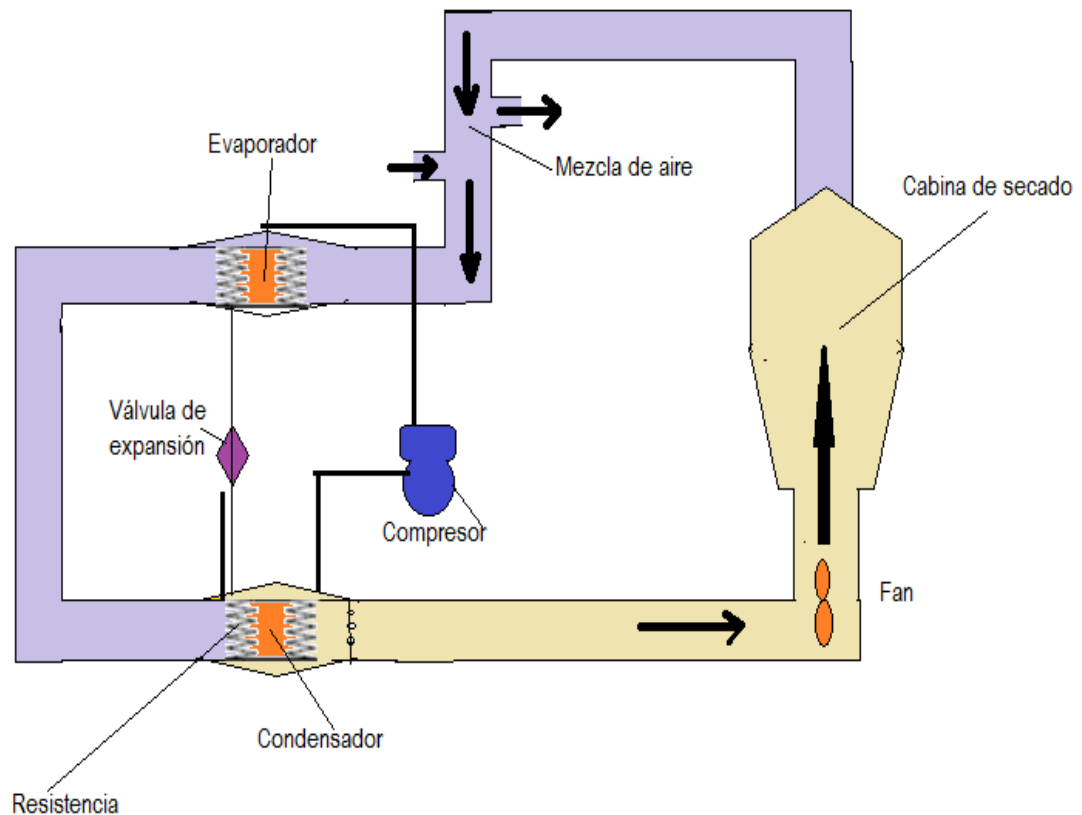


Figura 7 Diagrama del ciclo de deshidratadoras por bomba de calor

Ejemplo de un sistema de secado con bomba de calor:

1. Circuito de proceso de deshidratado
2. Compresor
3. Ventilador
4. Bomba de drenaje (opcional)
5. Segundo intercambiador de calor, calentador de aire
6. Enfriador secundario
7. Ventilador de enfriamiento
8. Circuito de refrigerante
9. Agua condensada
10. Primer intercambiador de calor, deshumidificador

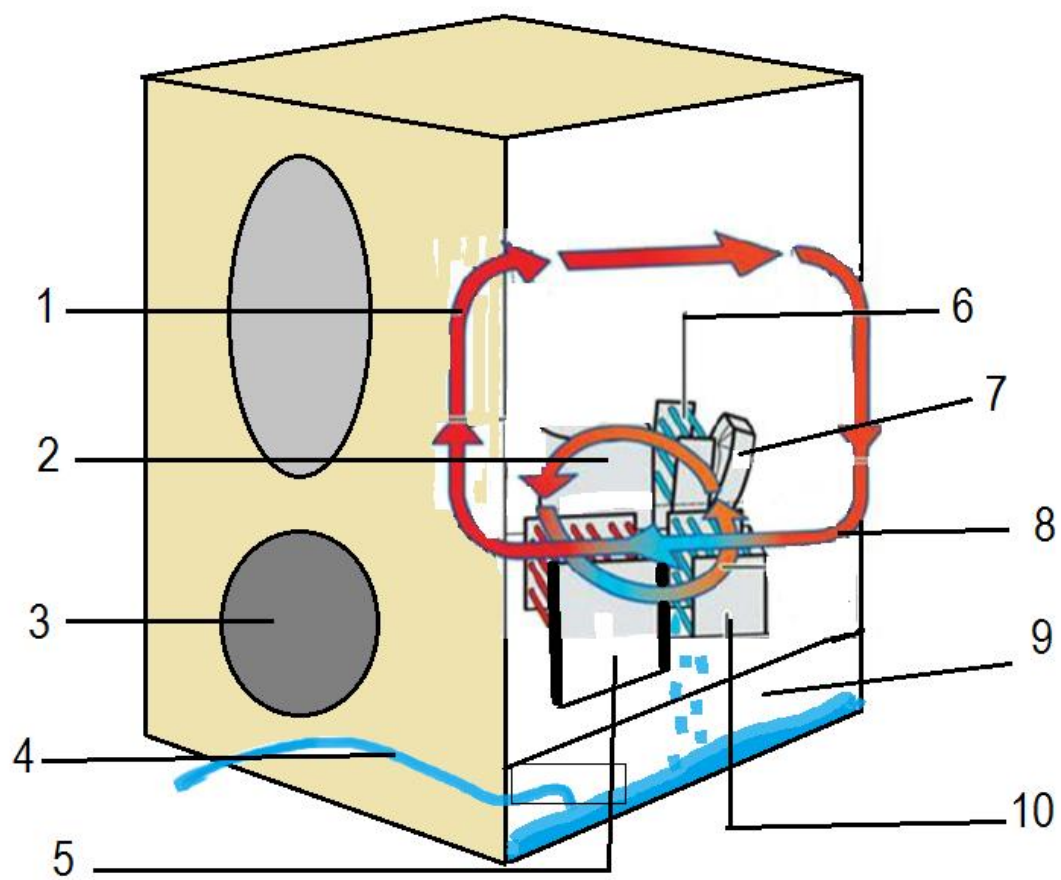


Figura 8 Sistema por bomba de calor

2.10 Referencias

- Yong, Ania, & Calves, Eduardo, & González, Yuly, & Permuy, Nénsida, & Pavón, María I. (2017). La conservación de alimentos, una alternativa para el fortalecimiento de la seguridad alimentaria a nivel local. *Cultivos Tropicales*, 38(1),102-107.
- Díaz Lorenzo, Tamara, & Cardona Gálvez, Marta, & Caballero Torres, Angel, & Morejon Martin, Pedro, & Sánchez Azahares, Yariela (2005). Caracterización de la conservación de alimentos en diferentes instalaciones. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas*, 36.
- Sun L, Islam MR, Ho JC, Mujumdar AS. A diffusion model for drying of a heat sensitive solid under multiple heat input modes. *Bioresour Technol* 2005; 96:1551–60.
- Hernández Rodríguez, José, & Quinto Diez, Pedro, & Barbosa Pool, Glicerio R, & Aguilar, Jorge O (2017). SECADO SOLAR DE FRUTAS Y VERDURAS EN QUINTANA ROO, MÉXICO. *Revista Iberoamericana de Tecnología Poscosecha*, 18(1), 1-8.
- Chua KJ, Mujumdar AS, Hawlader MNA, Chou SK, Ho JC. Batch drying of banana pieces – effect of stepwise change in drying air temperature on drying kinetics and product color. *Food Res Int* 2001; 34:721–31.
- Colak N, Hepbasli A. A review of heat pump drying: Part 1. Systems, models and studies. *Enero Convers Manage*. 2009 Sep; 50 (9): 2180-2186.
- Gómez-Daza, Juan C., y Ochoa-Martínez, Claudia I. (2012). Secador asistido por bomba de calor y secador convectivo con recirculación total: Alternativas para el secado de materiales agroalimentarios. *Vitae*, 19 (1), s36-s38.
- Monsalve, Jorge, & Machado, Marly (2007). Evaluación de dos métodos de deshidratación del tomate (*Lycopersicon esculentum* mill) variedad manzano. *Multiciencias*, 7(3),256-265.

- Vega A. Lemus. R. Importancia de las Isotermas en los Alimentos, Rev Indualimentos 2005;8 (35): 71-74.
- Vega A. Lemus R. Modelado de la cinética de secado de la papaya chilena (*Vasconcellea pubescens*), Rev Información Tecnol 2006; 27(3): 23-31.
- Toledo R.T. Dehydration. Fundamentals of Food Process Engineering. 2nd Edition. Editorial Chapman & Hall, New York · London, 1994, p 456-506.
- Marín B., Eduardo, & Lemus M., Roberto, & Flores M., Verónica, & Vega G., Antonio (2006). LA REHIDRATACIÓN DE ALIMENTOS DESHIDRATADOS. *Revista Chilena de Nutrición*, 33(3).
- Fraser G. E., Sabaté J., Beeson W.L., Strahan T.M. (1992).A possible protective effect of nut consumption on risk of coronary heart disease: The Adventist Health Study. *Arch Intern Med*; 152:1416-24.
- Krauss RM, Eckel RH, Howard B. et al. (2000). AHA Dietary guidelines. Revision 2000: A statement for Healthcare professionals from the nutrition committee of the American Heart Association. *Circulation*; 102: 2296-2311.
- Vidal Castrejón Amauri (2013). Diseño y construcción de un deshidratador híbrido con energías alternas. (Tesis de Ingeniería). Instituto Politécnico Nacional, México, D.F.
- S. Mustayen, S. Mekhilef and R. Saidur. "Performance study of different solar dryers: A review Renewable and Sustainable Energy Reviews". Vol. 34. June, 2014.
- Espinoza S., Jaime (2016). Innovación en el deshidratado solar. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 24(),72-80.
- Pérez, L. y Martínez, C.O. 2010 Técnicas para el deshidratado de mango. Fundación Produce. Sinaloa Méx. pp. 10

- CONAFOR (2008). Manual para la construcción de deshidratador solar. Transferencia de Tecnología y Divulgación sobre Técnicas para el Desarrollo Humano y Forestal Sustentable Deshidratador Solar de Alimentos
- Fito Maupoey, Pedro; Andrés Grau, Ana; Barat Baviera, José Manuel (2001). Introducción al secado de alimentos por aire caliente. Agronomía Hidráulica y Medio Natural Nº Edición: 1 / 29-05-2001 ISBN: 978-84-9705-025-8 Ref.: 4092
- Arun S. Mujumdar; Sachin V. Jangam, (2007). Handbook Industrial Drying E.U.A. Marcel Dekker Inc.
- Zhang X, Mao Z, Sun L. Heat pump fluidized bed drying of agricultural materials. Annual meeting of American Society of Agricultural and Biological Engineers. 2004.
- Carrillo Inungaray, María Luisa y Reyes Munguía Abigail. Vida útil de los alimentos Lifetime food. Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias ISSN 2007-9990 Vol. 2, Núm. 3 Enero - Junio 2013 CIBA
- Nijhuis, H.H.; Topping, H.M.; Muresan, S.; Yuksel, D.; Leguijt, C.; Kloek, W. 1998 Approaches to improving the quality of dried fruit and vegetables. Trends in Food Science and Technology 9(1), 13-20
- Muñiz Becerá, Sahylin, & Hernández Gómez, Antihus, & García Pereira, Annia, & Méndez Lagunas, Lilia (2013). Empleo del método de secado convectivo combinado para la deshidratación de papaya (Carica papaya L.), variedad Maradol roja. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 22,31-37
- Melo Cruz, Stephanie (2018). Conceptos de secado con aire caliente. Ingeniería en Alimentos. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. Universidad Autónoma de México.

Sanjuán N. Andrés J. Clemente G. Mulet A. Modeling of the Rehydration process of broccoli florets, European Food Res Technol 2001;212:449-453.

Yañez, Gildardo. (20221) Ciclo de Refrigeracion por Compresión – Ciclo Frigorífico. Extraído del 13 de septiembre de 2019 a las 18:26 has.

3. CONSTRUCTION OF A PROTOTYPE HEAT PUMP DEHYDRATOR FOR MANGO PULP AND PEEL

Felipe Espinoza¹, Federico Hahn²

¹ IAUIA, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Edo. México. Email:
f_5espinoz@hotmail.com

ABSTRACT

Currently the world trend is to consume organic and healthy products, such as dehydrated food, being a constant especially in the United States of America and Europe. Dehydration is one of the most widely used techniques for food preservation. However, it is often argued that drying equipment should have shorter process times, that provides higher product quality, less contamination, and higher added value. Some technological variables during the drying process can be controlled as temperature, relative humidity, air flow. This study exposes the construction of a heat pump dehydrator, through forced air convection, which operates in a closed environment, with total recirculation of the dehydrated air. Air temperature is controlled by means of a digital thermostat, which turns the heat pump on and off to maintain the desired temperature. Temperature and humidity sensors were installed inside the dehydration chamber at the inlet of the evaporator and at the outlet of the condenser. The dehydration temperature was controlled and monitored in the range of 55 ° to 60 ° C. Minimum relative humidity was 15% in the dehydration chamber when dehydrating mango peel and pulp. The minimum dehydration time was 8 hours, obtaining a product with a homogeneous appearance and without apparent damage. An electrical current consumption of 4.62 Amps was measured and the air speed was of 2.5 m / s.

Keywords: dehydrator, heat pump, temperature, time, relative humidity, air convection.

3.1 INTRODUCTION

Drying is one of the oldest food preservation processes. In dehydrated foods, according to Chua et al. (2001), the objective of drying is to reduce the moisture content of a product to achieve longer storage periods, producing a dry product of the desired quality at a minimum cost and good performance. It is important to optimize the design and operating conditions of the dryer equipment (Sun, et al. 2005).

Heat pump drying technology achieves all of these goals, by drying under controlled conditions such as temperature and humidity (Struvite, 2006). Furthermore, energy consumption is drastically reduced. Energy savings range between 60% and 80% meanwhile product quality is safely maintained (Colak, et al. 2009).

The consumption of dehydrated food has become a worldwide trend due to its multiple health benefits (Baker, 1997). Data supported by epidemiological studies, relate the frequent consumption of nuts and the reduction of the risk of suffering cardiovascular diseases (Fraser et al., 1992; Sabaté, 1999).

Agricultural dehydrated foods, must preserve their nutritional properties, to offer the best product quality. These products are evaluated by the amount of physical and biochemical food degradation (Aquino and Sánchez, 2015). Temperature, drying time and water activity are the main variables. Minimum water activity stops microorganism proliferation and most chemical and enzymatic alteration reactions are stopped (Vega et al. 2009). Agricultural product dehydration will allow their storage without decomposition risk. Also, this dried food could be used to obtain pectin's, powders, and other products.

A heat pump-assisted convection dehydrator equipment was developed and evaluated. Its viability to be used in the dehydration of agricultural products was analyzed to determine whether foods can retain their physical properties.

3.2 Material and Métodos

The heat pump prototype was built with commercial components such as the compressor, sensors and fans. The electrical control circuit and heat exchangers were built and implemented according to the requirements of the prototype. Adjustments were made to the heat pump to obtain the highest possible operating efficiency.

The dehydration equipment based on a heat pump was built, which consisted of: the structure, dehydration chamber, air circulation ducts and supports necessary to integrate the heat pump, blower, mechanical components, electrical and electronic circuits. A fully functional and efficient heat pump dehydrator equipment resulted.

Performance tests of the heat pump dehydration equipment were carried out and the necessary adjustments were made to maximize the efficiency of the equipment in the dehydration of mango pulp and peel and leaves. The dehydration temperature range was 40 to 60 ° C.

3.3 Construction of the heat pump unit

Commercial materials, tools and equipment commonly used in domestic refrigeration were used for the construction of the heat pump unit.

1. Refrigerant Gas R-134^a
2. 5/8 Inch Flexible Copper Tubing
3. Silver solder for cooling
4. Solder flux
5. High temperature torch for cooling
6. Mini Tube Cutter
7. Pressure gauges for gas charging and refrigeration service
8. Multimeter

The refrigeration components used were the commercial ones for domestic refrigeration. The heat pump unit used in this prototype employed a refrigeration unit of ¼ HP capacity. The unit elements are listed below:

1. ¼ HP compressor with electric starting elements and thermal protection
2. ¼ HP Capacitors
3. 2 Evaporators
4. 2 Filter driers
5. 2 micro fans
6. 1 capillary tube

3.3.1 Refrigeration Component Assembly Process

1. Arrangement and preparation of components (Figure 10 and 11)
2. Welding of refrigeration components and union by flexible pipe
3. Installation of micro fans and electrical components
4. Cleaning the system and pressurizing with R-134a gas to eliminate dirt and humidity as well as to verify the absence of leaks in the system.
5. Refrigerant gas charge and working pressure calibration based on the capacity of the refrigeration components. Working Pressure had a low value of 30 Psi; Compressor Working Amperage 3.9 A (Figure 12)
6. Start-up of the heat pump unit and basic functional tests. (Figure 15)

3.3.2 Integration of a heat pump to a dehydration chamber prototype

Since the heat pump unit was in optimal functional conditions, a prototype of a drying chamber was elaborated. The heat pump was integrated to generate heat and condense the humidity during the dehydration process. The heat pump in hermetic conditions was completely isolated for calibration from the ambient

environment. A drying chamber was built, and the refrigeration components integrated, to obtain the product dehydration chamber and the dehumidification chamber. Three relative humidity and temperature sensors with display were installed. The first sensor was installed inside the dehydration chamber (aside from the air dehumidification chamber). The second sensor was installed at the outlet of the dehumidification chamber next to the centrifugal fan. The third sensor was placed after the serpentine heat exchanger that preheats the air that has been dehumidified. Finally, an electronic control thermostat was installed with the sensor in contact with the product to be dehydrated at the dehydration chamber.

A 1/6 HP air blower was used to generate air movement through the system. The prototype walls were made of 1" thick Styrofoam sheets in order to keep the system isolated from the outside temperature. A 3" diameter PVC pipe recirculation duct was used.

Description of the prototype of heat pump dehydration equipment for mango peels and pulp.

The prototype developed has as its main heating element a flat heat exchanger in the form of a metallic grid, which is the condenser of the heat pump. The heat exchanger is in direct contact with the tray that contains the product to be dehydrated. The prototype has 4 main elements:

- Dehydration chamber. It contains the condenser (hot exchanger), the dehydration trays and the preheated air outlets.

- Dehumidification chamber. It contains the evaporator or heat pump cold zone, through which air dehumidification is carried out. Air humidity condensation takes place and is transformed into liquid water, extracted by a drainage duct.

- Centrifugal fan or blower and air recirculation ducts. These components recirculate the air from the dehydration to the dehumidification chamber. It circulates air from the preheating area and back to the dehydration chamber. The cycle is repeated during all the dehydration process. The cycle is carried out

in a hermetic environment isolated from the external air of the dehydrating equipment.

-Compressor. It compresses the refrigerant gas that circulates through the heat pump ducts so that expansion and evaporation takes place. The compressor is controlled by a thermostat that turns it on or off depending on the temperature of the dehydration chamber.

The dehydrator prototype is provided with temperature and relative humidity sensors distributed in the working areas of the dehydrator, as mentioned in Figure 9.

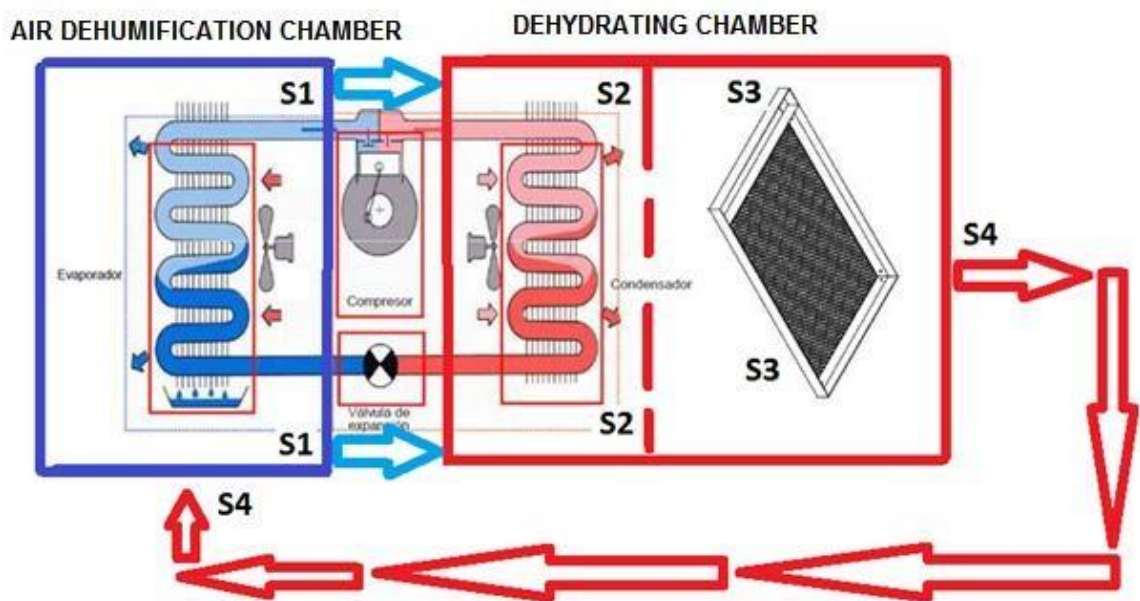


Figura 9 Dehydrator with temperature and relative humidity sensors

S1: Temperature and relative humidity sensor with data logger at the evaporator outlet to record air temperature and humidity that was dehumidified.

S2: Sensor at the condenser output monitors the temperature and humidity of the air after being heated.

S3: Sensor in the central area of the dehydration chamber to monitor the temperature and humidity at the product.

S4: Sensor at the dehydration chamber output to know the air humidity and temperature after a dehydration cycle.

3.4 Heat pump dehydrator prototype construction process



Figura 10Dehydrator structure



Figura 11 Refrigeration tools and components



Figura 12 Initial phase of construction of the dehumidification chamber



Figura 13 Pipes for dehydrated air recirculation



Figura 14Air recirculation blower

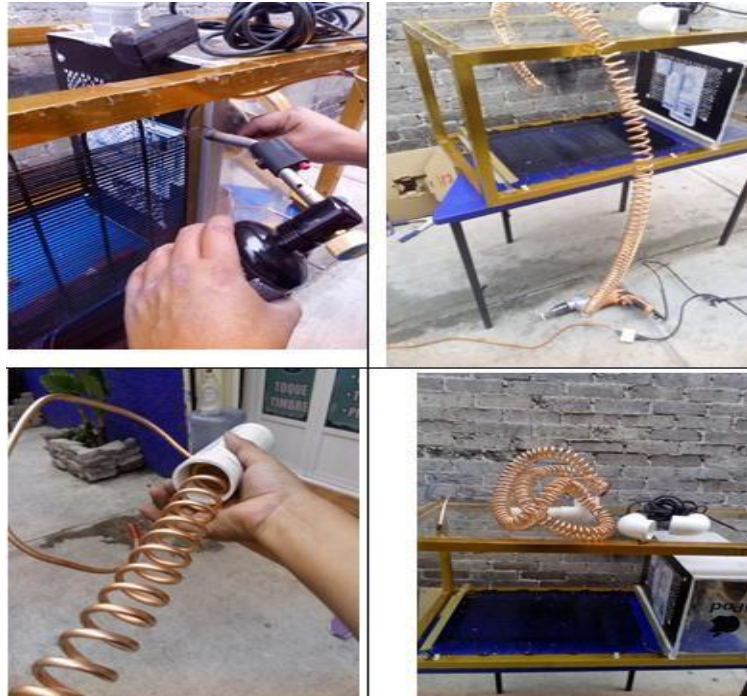


Figura 15 Installation of condenser, evaporator and heat exchanger coil for air preheating



Figura 16 Compressor installation, system vacuum, charging and calibration of the refrigerant gas pressure



Figura 17 Heat pump and dehydration chamber assembly

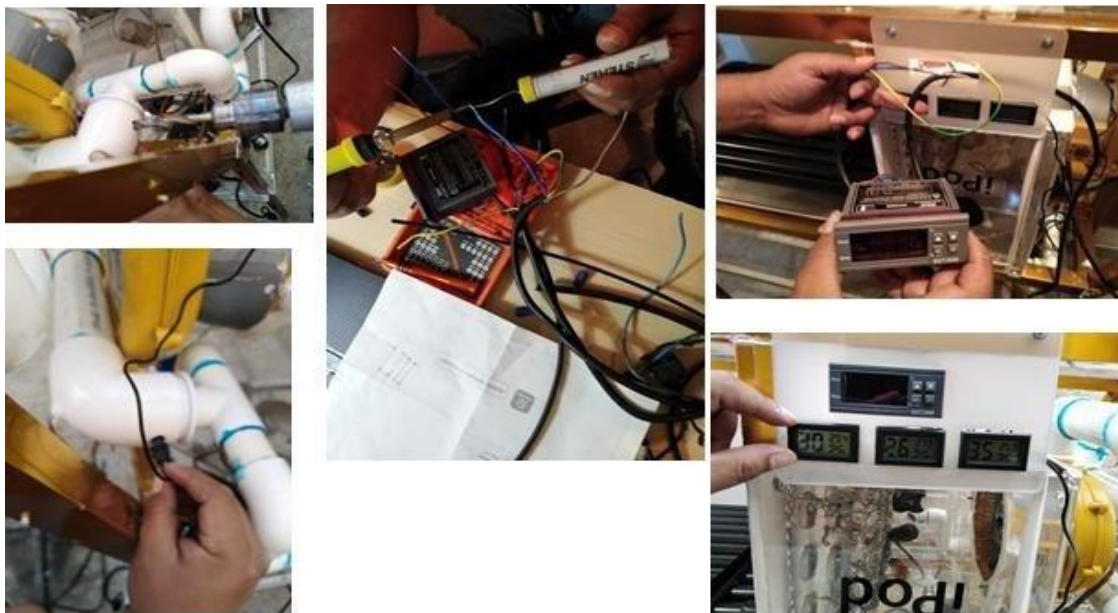


Figura 18 Temperature and relative humidity sensors together with electronic control thermostat



Figura 19 Equipment operation and preliminary tests of operation

3.5 Discussion and results

In the initial tests, maximum dehydration temperatures of 60 °C and minimum relative humidity of 9.5% have been obtained in the dehydration chamber with d mango peels and pulp. The prototype's power consumption in the current configuration is 4.62 Amps.

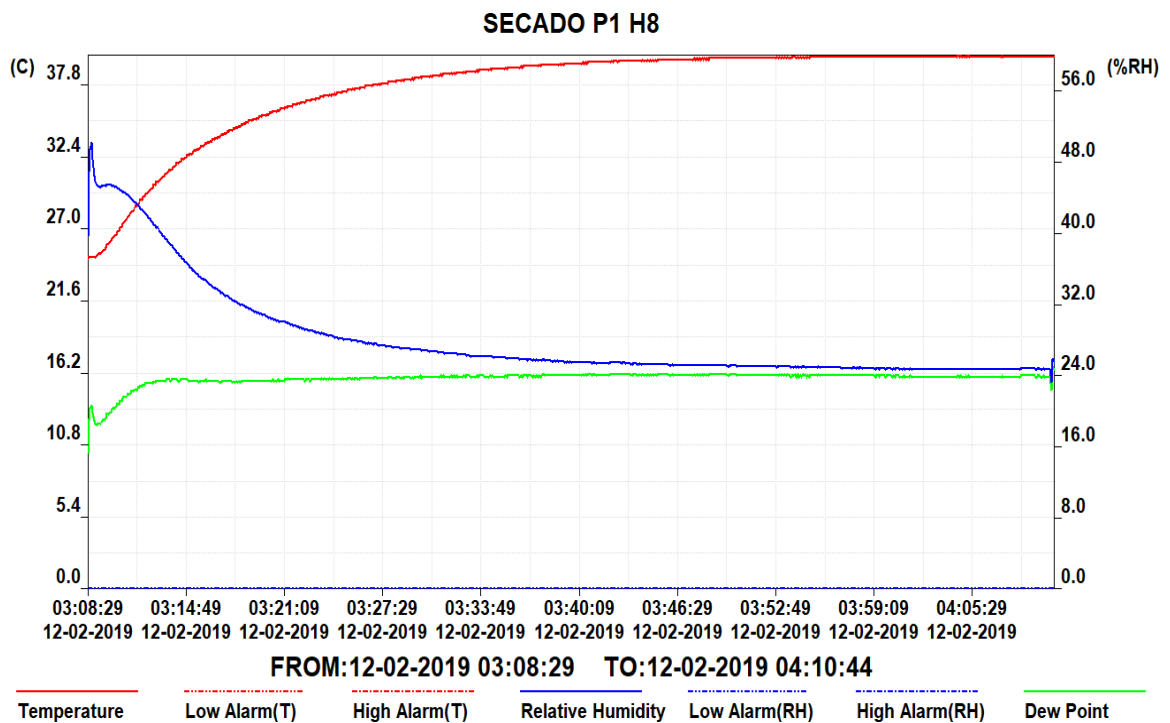


Figura 20 Relative humidity and temperatures in the dehydration chamber, test
1- hour 8

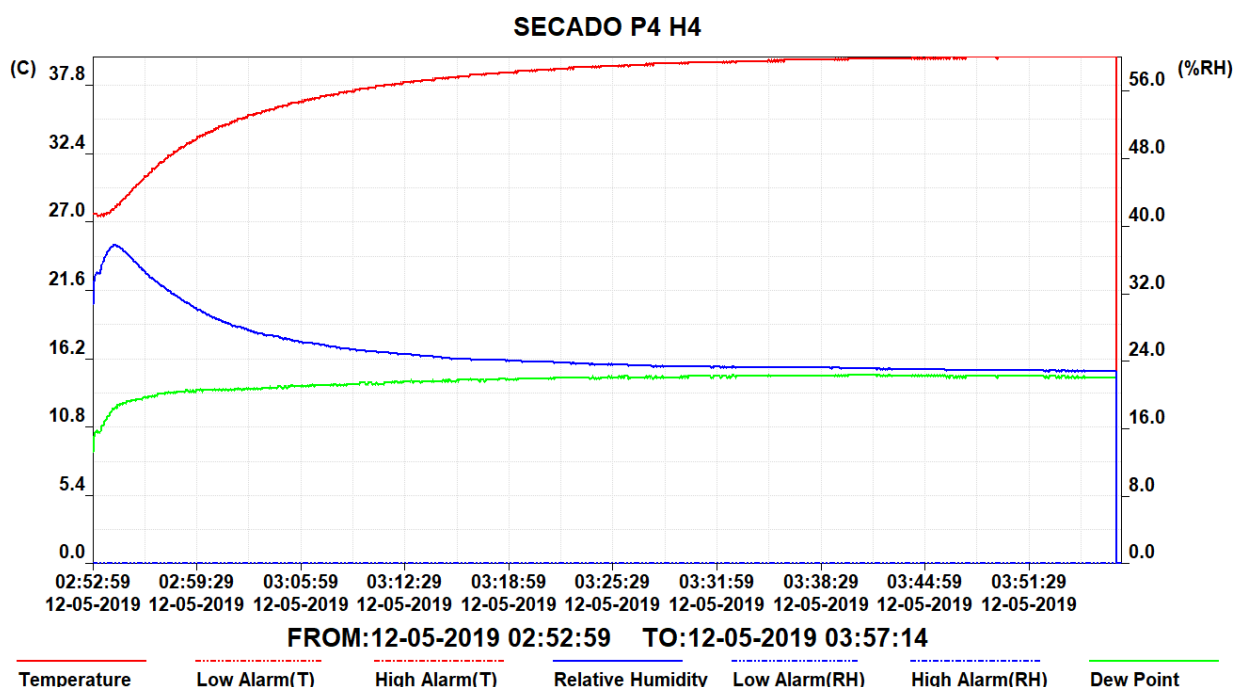


Figura 21 Relative humidity and temperatures in the dehydration chamber, test 4
- hour 4

3.6 CONCLUSION

The developed heat pump dehydrator prototype was effective in dehydrating mango pulp and peel. By incorporating the temperature control element makes it possible to apply it in the dehydration of various agricultural products. It is advisable to control the air speed during dehydration. It is possible to build an equipment with greater capacities.

3.7 REFERENCES

- Baker GJ. Industrial drying of foods, chap 4. London: Chapman and Hall; 1997. pp. 65–89.
- Chua KJ, Mujumdar AS, Hawlader MNA, Chou SK, Ho JC. Batch drying of banana pieces – effect of stepwise change in drying air temperature on drying kinetics and product color. *Food Res Int* 2001; 34:721–31.
- Colak N, Hepbasli A. A review of heat pump drying: Part 1. Systems, models and studies. *Energy Convers Manage*. 2009 Sep; 50 (9): 2180-2186.
- Fraser GE, Sabate J, Beeson WL, Strahan TM. A possible protective effect of nut consumption on risk of coronary heart disease. The Adventist Health Study. *Arch Intern Med* 1992; 152:1416-24.
- Struvite C, Jones PL, Z'ytta R. Energy aspects in drying. In: Mujumdar AS, editor. *Handbook of industrial drying*. Boca Raton, FL, USA: Taylor & Francis Inc.; 2006.p. 1084.
- Sun L, Islam MR, Ho JC, Mujumdar AS. A diffusion model for drying of a heat sensitive solid under multiple heat input modes. *BioresourTechnol* 2005; 96:1551–60.
- Vega-Gálvez, Antonio & Chacana, Marcelo & Lemus-Mondaca, Roberto. (2009). La industria de los alimentos deshidratados y la importancia del control del proceso. *Revista Indualimentos*.

4. AUTOMATIC SAMPLING OF PRODUCT TEMPERATURE AND MOISTURE WITHIN A HEAT PUMP APPLE DRYER

Felipe Espinosa and Federico Hahn*

IAUIA Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco México

*Corresponding author: Federico Hahn, IAUIA Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco México email: fhahn@correo.chapingo.mx

Abstract

Food losses in perishable fruits are present worldwide and in many cases half of the fruit harvested is lost. Drying is the oldest and most common food conservation process that increase product shelf life. However, some nutritional properties can be lost if dryer variables are not properly controlled. Heat pump drying (HPD) is useful for food products having high initial moisture as the dryer keeps the air relative humidity beneath 20%. A monitoring system was developed to check the homogeneity of each of the apple slices within a tray. The system touches all the slices within one row, before it moves to the next one. Product moisture was measured with a bifurcated optical fiber that acquired the 950nm and 800 nm wavebands and converted them to electrical signals with photodiodes. Surface plots show moisture measurements taken once the tray was inserted and two hours later.

Keywords: Heat pump dryer, apple slices, moisture fiber optic sensing, product temperature sensing.

4.1 Introduction

Half of all the fruit and vegetables produced worldwide are lost or wasted, representing 1.3 billion tons annually Porat, R. (2008). Fruit processing is becoming necessary to avoid its spoilage. Food dehydration is a common food conservation practice for increasing fruit shelf life. This technique maintains product sensorial attributes and can be easily transported worldwide after proper packing. Noori AW (2019)

Drying removes free water from food reducing microbial spoilage and enzymatic reactions. Akharume F (2018) Food drying has been extensively studied in the last years trying to obtain high drying rates while maintaining product quality. Royen MJ (2020).

Energy consumption during drying has to be optimized, meanwhile fruit texture, flavor and chemical components persist Natal T. (2015). Drying consumes 10-15% of the total industrial energy demand in Canada, France and the USA Montevali A. (2014). Solar and hot air drying are the most common used methods due to their simplicity, but their performance is questionable due to long drying time and poor energy efficiency Antal T. (2015), Feng H (1998), Sharma A (2009).

Total energy consumption in drying apple slices increased with air velocity and decreased with air temperature. Its energy efficiency varied from 2.87 to 9.11% Beigi M (2016)

Postharvest studies in the United States indicate that 8.6% fresh apples are lost at retail and 20% at consumer level Buzby JC (2011).

Apple dehydration methods include solar, tunnel, microwave, infrared and freeze drying. Nunes C (2015). Hot air circulates through trays enclosed in a cabin and the poor drying and energy efficiency depends on airspeed and heaters Antal T. (2015), Beigi M (2016), Nunes C (2015), RasooliSharabiani V. (2021). High

quality food use vacuum-microwave and Refractance Window drying OzanKahraman O (2021) due to its better energy efficiency.

Heat pump technology has been used to dry food based on dehumidification/heating principles. Heat pump drying (HPD) has been found to be more effective in drying materials with high initial moisture and in very humid places Sosle V (2001).Heat pump drying is now encountered in food industries due to its low energy consumption, minimum quality loss and high drying performance. HPD dries fruit with lower air temperature and relative humidity preserving heat-sensitive vitamins Hawlader MNA (2006), Salehi F (2021).

A system composed of a solar and a HPD dryer combination can be more efficient Aktaş M. (2009). Solar drying can take place in daytime meanwhile heat pump drying can be effective at night.

Fruit slices are introduced in trays and require from continuous temperature and moisture sampling. Single-point spectroscopy in the visible and near infrared region (Vis-NIR) Ren G, Chen F (1997) is a non-destructive technique used to monitor quality changes in the food industry. In a study carried out with mango it was found that at the 532 and 785 nm wavebands, moisture changes were detected Romano G. (2016) Reflectance to transmittance ratios in the photosynthetic domain at 555 nm represent a cost-effective alternative for water stress and quality estimation in maize Baranoski GVG (2017). The reflectance regions at 765–784 nm, and 950–957 nm are described as water absorption wavebands Chandel NS (2020)

In this paper we describe an automatic system for sampling moisture and temperature of apple slices within a heat pump dryer. A mechanism was designed to move the sensors and measure both air and product variables.

4.2 Heat pump dryer

The block diagram of the heat pump dryer (Figure 22) shows the refrigerant cycle being its path highlighted by a blue line. The refrigerant components are a SM120S4VC scroll compressor, a condenser, an evaporator, and an expansion valve Aktaş M (2009) Airflow within the drying chamber circulates through the evaporator and the condenser as shown by the black line in Figure 22. Fans make airflow circulation possible.

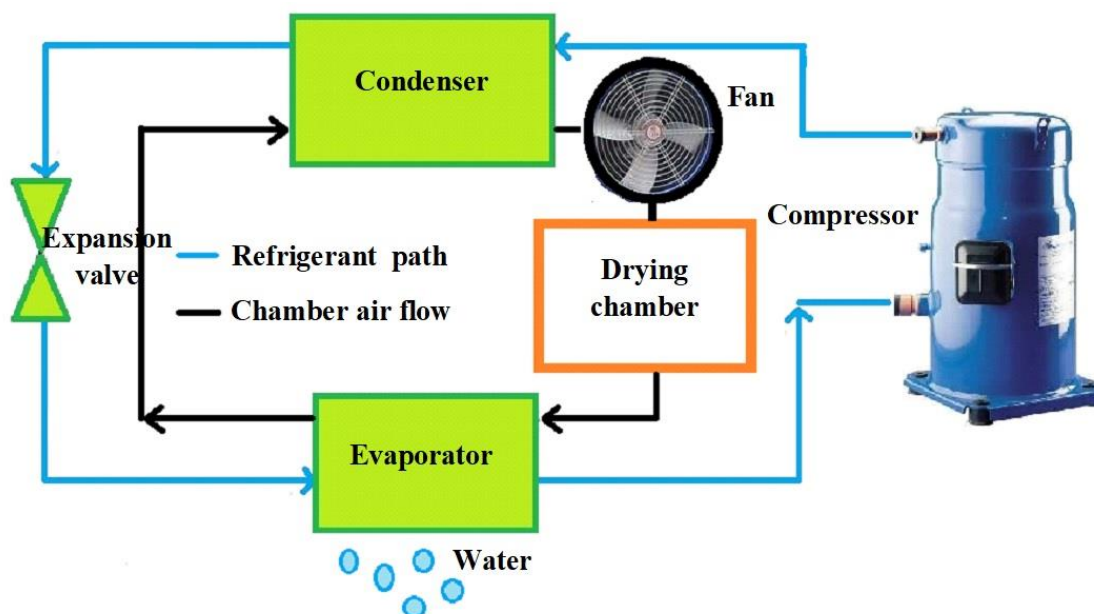


Figura 22 Block diagram of the heat pump dryer showing the refrigerant and drying chamber paths

4.3 Air temperature, air relative humidity and slice temperature sampling

Air temperature and relative humidity were measured with DHT22 sensors (Adafruit, Australia). The sensor uses a capacitive circuit to measure air humidity and a thermistor to measure temperature. There were 5 circuits installed inside the dryer hanging between the top bar (TBAR) and the bottom bar (BBAR), Figure 23. These circuits were connected through an I2C connection to an Arduino UNO microcontroller, sampling air variables every minute.

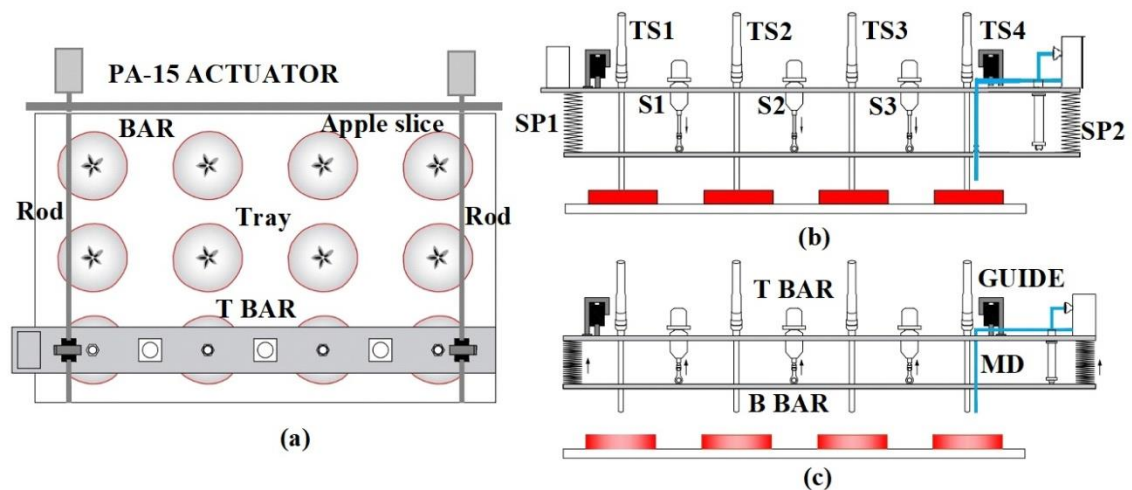


Figura 23 Prototype used to measure fruit temperature showing (a) top view, (b) lateral view with released solenoids, and (c) lateral view after solenoids activation.

Figure 23. Dryer control based on product temperature demands less energy than with air temperature control. Therefore, a prototype was designed to measure food temperature by contact using J type thermocouples (TS1-TS4). In figure 23 only 4 thermocouples are shown, but the prototype used five sensors per row. The main elements used by the automatic monitoring process were a linear actuator, three solenoids (S1-S3) and two rectangular bars separated by springs (SP1, SP2). The bottom bar has the thermocouples fixed (figure 23b), and the metal rod plunger of the solenoids welded. After releasing the 120 V solenoids the sensors touch the apple slices and measure their temperature (Figure 23b). When the solenoids are energized, the bottom bar is lifted (Figure 23c) and the bars are free to move, letting a distance of 10 mm between the apple slices and thermocouples. A linear actuator (PA 15, Progressive Automations, and USA) with a 12 V brushed DC motor was employed to move the thermocouple bar back and forth.

Apple slices measurements were done automatically and uses a microcontroller (Arduino UNO) to provide sampling time and actuator voltage. When the T BAR is over the 5 apple slices of the first row and the solenoids are turned-off, the J-

thermocouples touch the slices (Figure 23b & Figure 24). The springs will maintain the bottom bar (BBAR) down and temperature measurements of five slices are taken simultaneously at the first row. After 10 seconds, energy is supplied to the solenoids lifting the BBAR. A voltage pulse is applied to the PA-15 actuator until it arrives to the second row of apple slices, being the sampling process repeated.

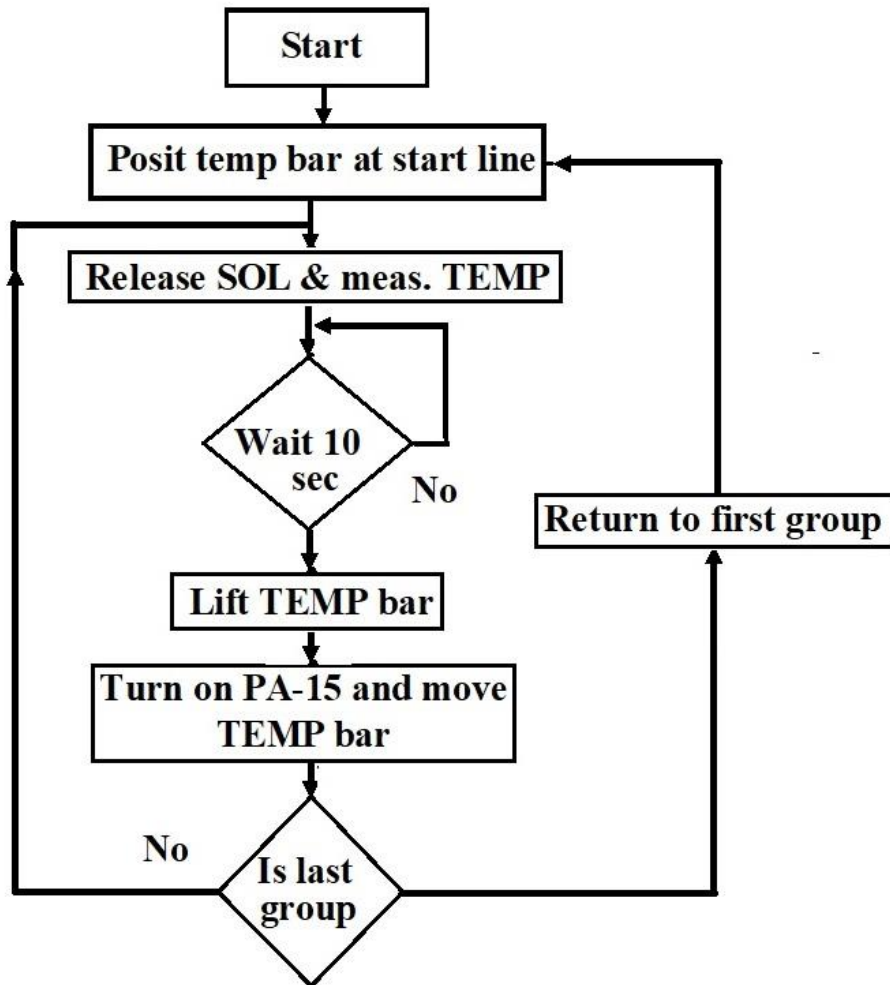


Figura 24Flowchart for synchronous product temperature measurement

4.4 Apple slice moisture detection

An optical sensor was developed (Figure 25a) to detect moisture in apple slices. Two hundred samples were acquired from random apple slices using a Vis-NIR spectrometer (USB2000+, Ocean Optics Inc. USA). After analyzing the spectral signatures with discriminant analysis, the best wavebands for moisture detection were 950 nm and 800 nm.

A light source illuminates the bifurcated optical fiber system at one end, and reflected light from the sample is obtained at the other fiber end (Figure 25a). The reflected light arrives to a NIR beam splitter (mod 47-123, Edmund Scientific, USA), that outputs two identical 50R/50T reflectance and transmission optical beams (Figure 25b). Each beam is filtered by a band pass filter (mod 65-118 for 800 nm and mod 88-569 for 950 nm, Edmund Scientific, USA). The optical information is directed to photodiodes and converted to electrical signals. After amplifying the photodiode signals with two precise, zero-drift operational amplifiers (LTC1050, Linear Technology Inc., USA) it is acquired by an Arduino UNO microcontroller and saved in memory. The PIN photo detector (PS7-5, First Sensor Inc., USA) was used for 800 nm detection, meanwhile a precise PIN photodiode (S1223, Hamamatsu Inc., Japan) detected the 950 wavebands.

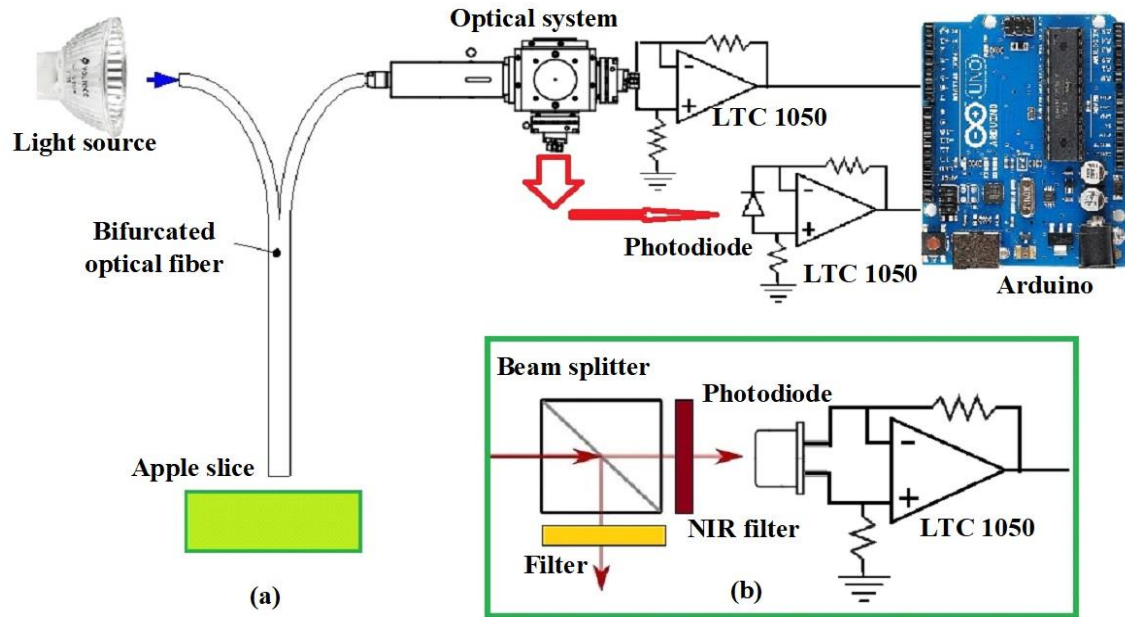


Figure 25 Optical fiber sensor (a) detects apple slice moisture, being (b) composed of a beam splitter, filters and photodiodes.

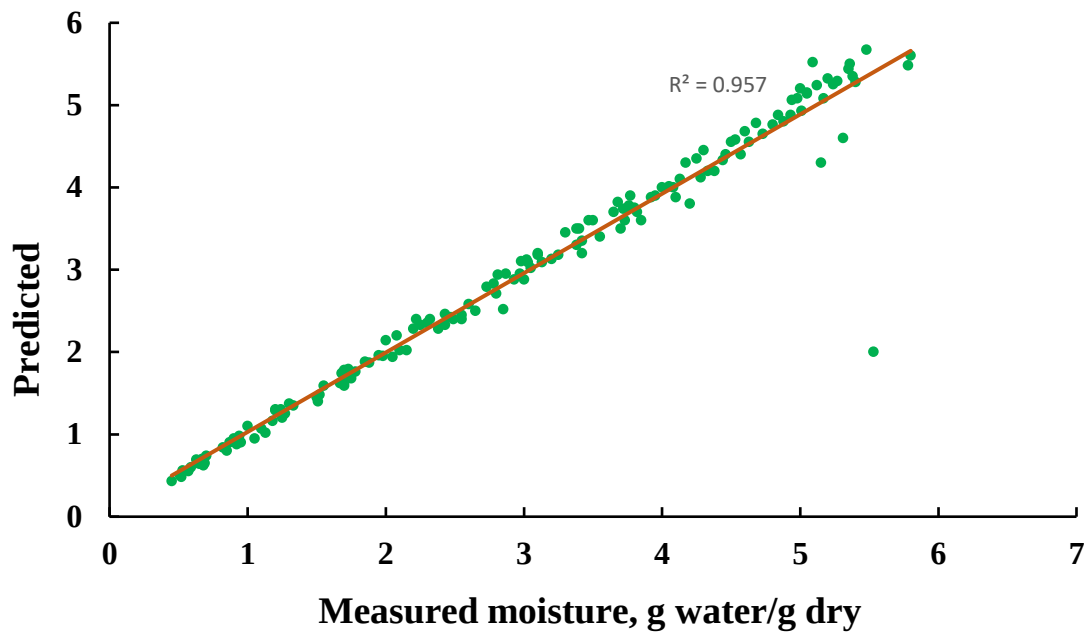


Figure 26 Optical fiber sensor measurement correlated apple slice moisture given in grams of water against grams of dried solid content.

Two hundred apple samples were measured at different drying stages with the optical sensor, weighted with a balance and then dried in an oven to obtain the dry weight without water. A linear curve resulted between real and optical moisture measurements having a R^2 of 0.957 (Figure 26).

4.5 Results

Apple slices 6 mm thick were cut filling three trays of the HPD dryer. Only the top tray was monitored as the surface over it let a space for the prototype movement. Air temperature was of 40°C and air relative humidity 20%. These measurements were taken with the DTH22 sensors and were constant during the entire 250 min drying time. Temperature measurements taken with the prototype showed apple slice variations after 90 minutes of drying (Figure 27). Temperature of the 25 slices varied from 32.4 to 33°C. The X and Y axis number represents the slice number given in cartesian format (1,1; 3,4). The first case (1,1) represents the apple slice in the first row, being at left position. The second case (3,4) shows the middle apple slice (3) of the fourth row.

Optical fiber and photo detectors have been used to monitor chemical concentrations [22]. Optical moisture measurements were taken to 25 samples positioned over the top tray. Once the dryer was hot and the trays introduced, the 25 apple slices of the top tray had moisture content values between 76 and 78% (Figure 28a). After drying for 120 minutes, the slices reduced their moisture content considerably to values within 18 and 22% (Figure 28b). The slices at (2,4; 3,2 and 4,4) were smaller and shrunked quickly [23]; optical measurements were not taken over the fruit surface and their values were below 11%.

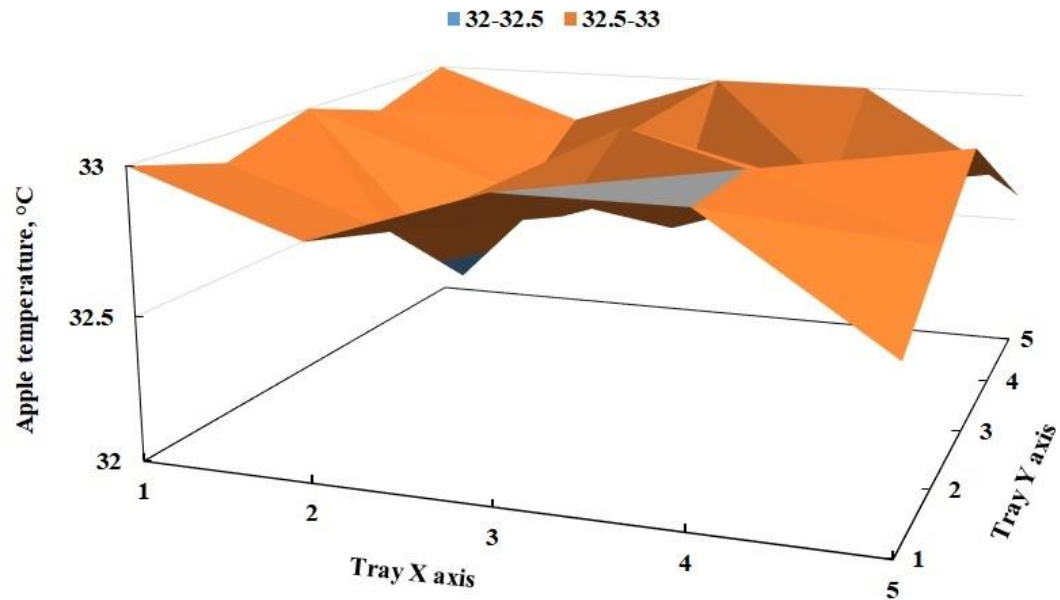


Figura 27 Temperature apple slices surface plot.

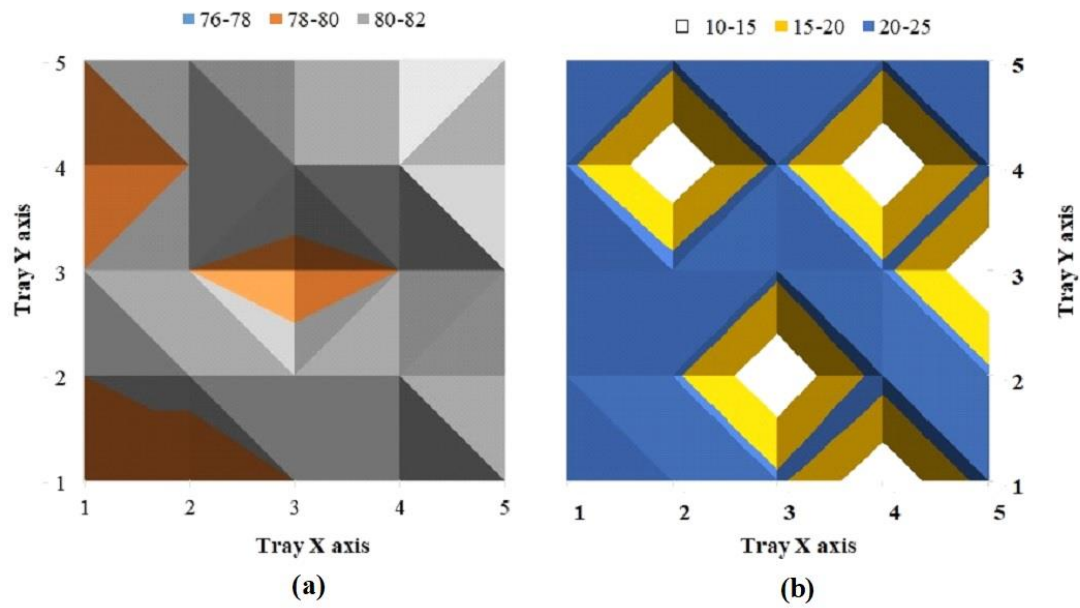


Figura 28Moisture area plot of apple slices (a) just introduced to the HPD dryer, and (b) two hours later

4.6 Conclusion

This work shows an automatic system for drying apple slices. It measures temperature and moisture content of the fruit during the drying process as it can provide a better signal for energy-efficient dryers. The system can include more thermocouples and use instead infrared sensors avoiding solenoid lifting and releasing. The moisture optical sensor used 800 nm and 950 nm waveband filters. The optical sensor can be transformed to measure another fruit nutrients during drying by changing the waveband of the filters.

4.7 Acknowledgements

We would like to acknowledge all the technical staff of the University that provided funding to build the prototype. As well we would like to thank MI Angel Hernandez Facundo for his help in the development of all the drawings.

4.8 References

- Porat R, Lichter A, Terry LA, Harker R, Buzby J (2018) Postharvest losses of fruit and vegetables during retail and in consumers' homes: Quantifications, causes, and means of prevention *Postharvest Biol. Technol.* 139: 135-149
- Noori AW, Royen MJ, Haydary J (2019) an active indirect solar system for food products drying. *Acta Chim. Slovaca* 12: 142–149.
- Akharume F, Singh K, Jaczynski J, Sivanandan L (2018) Microbial shelf stability assessment of osmotically dehydrated smoky apples. *LWT* 90: 61–69.
- Royen MJ, Noori AW, Haydary J (2020) Experimental Study and Mathematical Modeling of Convective Thin-Layer Drying of Apple Slices. *Processes* 8(12):1562.
- Antal T (2015). Comparative study of three drying methods: freeze, hot air-assisted freeze and infrared-assisted freeze modes. *Agronomy research* 13: 863-878.
- Motevali A, Minaei S, Banakar A, Ghobadian B, Khoshtaghaza MH (2014) Comparison of energy parameters in various dryers. *Energy Conversion and Management* 87: 711-725.

- Feng H, Tang J (1998) Microwave finish drying of diced apples in a spouted bed. *J. Food Sci.* 64 (4): 679-683.
- Sharma A, Chen CR, Lan NV (2009) Solar – energy drying systems: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13(6): 1185-1210.
- Beigi M (2016) Energy efficiency and moisture diffusivity of apple slices during convective drying. *Food Science and Technology*. 36. 10.1590/1678-457X.0068.
- Buzby JC, Hyman J, Stewart H, Wells HF(2011) The value of retail and consumer level fruit and vegetable losses in the United States *J. Consum. Aff.* 45: 492-515.
- Nunes C, Ribeiro T, Nunes, J (2015). Comparative Analysis of Dehydration Methods for Apple Fruit. *Revista de Ciencias Agrarias* 38: 282-290.
- Rasooli Sharabiani V., Kaveh M, Abdi R, Szymanek M, Tanaś W (2021) Estimation of moisture ratio for apple drying by convective and microwave methods using artificial neural network modeling. *Sci Rep* 11, 9155.
- Ozan Kahraman O, Malvandi A, Vargas L, Feng H (2021) Drying characteristics and quality attributes of apple slices dried by a non-thermal ultrasonic contact drying method. *Ultrasonics Sonochemistry* 73: 105510.
- Sosle V, Raghavan GSV, Kittler R (2001). Experiences with a heat pump dehumidifier assisted drying system. *Proc.1st Nordic Drying Conference*. June 2001. Trondheim, Norway.
- Hawladar MNA, Perera CO, Tian M (2006) Properties of modified atmosphere heat pump dried foods. *J. Food Eng* 74(3):392–401.
- Salehi F (2021) Recent Applications of Heat Pump Dryer for Drying of Fruit Crops: A Review. *International Journal of Fruit Science* 21(1): 546-555.
- Aktaş M, Ceylan İ, Yilmaz S (2009). Determination of drying characteristics of apples in a heat pump and solar dryer. *Desalination* 239: 266-275.
- Ren G, Chen F (1997) Determination of moisture content of ginseng by near infra-red reflectance spectroscopy. *Food Chem.* 60: 433–436.
- Romano G, Nagle M, Müller J. (2016) Two-parameter Lorentzian distribution for monitoring physical parameters of golden colored fruits during drying by application of laser light in the Vis/NIR spectrum. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 33: 498–505.

- Baranoski GVG, Van Leeuwen SR (2017) detecting and monitoring water stress states in maize crops using spectral ratios obtained in the photosynthetic domain. *Journal of Applied Remote Sensing* 11(3): 036025.
- Zhang Q, Li Q, Zhang G (2012) Rapid Determination of Leaf Water Content Using VIS/NIR Spectroscopy Analysis with Wavelength Selection. *Journal of Spectroscopy* 27. ID 276795.
- Chandel NS, Rajwade YA, Golhani K, Tiwari PS, Dubey K, Jat D (2020). Canopy spectral reflectance for crop water stress assessment in wheat (*Triticumaestivum*, L.). *Irrigation and Drainage* 70: 321– 331. 10.1002/ird.2546.
- Pérez MA, González O, Arias JR. (2013) Optical fiber sensors for chemical and biological measurements. In *Current Developments in Optical Fiber Technology*. Intech Open. London, UK. Chapter 10: 265–291.
- Mbarek R, Mihoubi D (2019) Development of Physical Properties of Apple during Dehydration. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering* 63(4): 591–599

5. APÉNDICES

5.1 DISEÑO CONCEPTUAL DE LA DESHIDRATADORA POR BOMBA DE CALOR

5.1.1 Diseño

El proceso de diseño conceptual del prototipo de deshidratadora por bomba de calor se basó y fundamentó en el estudio teórico de los sistemas frigoríficos comerciales y equipos de climatización por bomba de calor.

De igual forma se tomaron las características buscadas en los productos agrícolas deshidratados, que conservaran sus características fisicoquímicas y organolépticas (color, olor y sabor)

5.1.2 Características técnicas consideradas para el equipo deshidratador.

- Proceso de deshidratación en ambiente cerrado
- Control de temperatura electrónico
- Recirculación total del aire de deshidratado
- Control de la velocidad del flujo del aire
- Circulación homogénea del aire deshidratado por el producto a deshidratar
- Monitoreo permanente de la temperatura y humedad relativa de la cámara de deshidratado.
- Optimizar el volumen de la cámara de deshidratado para maximizar la capacidad del equipo.

Al considerar las características buscadas en los productos agrícolas deshidratados y las consideraciones técnicas enlistadas se obtuvo una idealización de un prototipo con las siguientes características:

- Cámara hermética formada por la carcasa de un enfriador vertical comercial de baja presión.
- Empleo de sistema frigorífico de $\frac{1}{4}$ de Hp de potencia.
- Uso de gas refrigerante R-134^a

- Presión de operación del gas refrigerante de 40 PSI
- Deshidratador formado por 12 parrillas de malla de aluminio estáticas horizontales.
- Ventiladores axiales de alto flujo para recirculación de aire de deshidratación
- Implementación de termostato electrónico
- Implementación de variador de potencia electrónico para ventiladores
- Temperatura regulable con operación de 10 a 55 °C dentro de la cámara de deshidratación
- Velocidad de recirculación del aire regulable de 0.5 a 3.5 m/s dentro de la cámara de deshidratado.

5.1.3 Plano del prototipo deshidratador

A continuación se presenta el plano del prototipo de deshidratadora por bomba de calor para productos agrícolas, diseñado en Solid Works.

Anexo 1. Medidas generales del deshidratador por bomba de calor

Anexo 2. Nombres de los componentes del deshidratador por bomba de calor

Anexo 3. Modelo tridimensional del deshidratador por bomba de calor

5.1.4 Proceso constructivo del prototipo vertical

A continuación se presenta el proceso constructivo del prototipo de deshidratadora por bomba de calor.

En la etapa inicial del prototipo, se adecuó una carcasa de un equipo frigorífico comercial, como cámara de secado. Ilustración 29

Se adecuaron los evaporadores y condensadores de la bomba de calor Ilustración 30, y se realizó la instalación de ventiladores para recircular el aire caliente dentro de la cámara de secado. Ilustración 31

Se instalaron los sensores de temperatura general (termostato electrónico) y sensor de humedad relativa interna de la cámara de secado. Ilustración 32



Figura 29 Carcasa de frigorífico



Figura 30 Soldadura de compresor y evaporador



Figura 31 Instalación de ventiladores

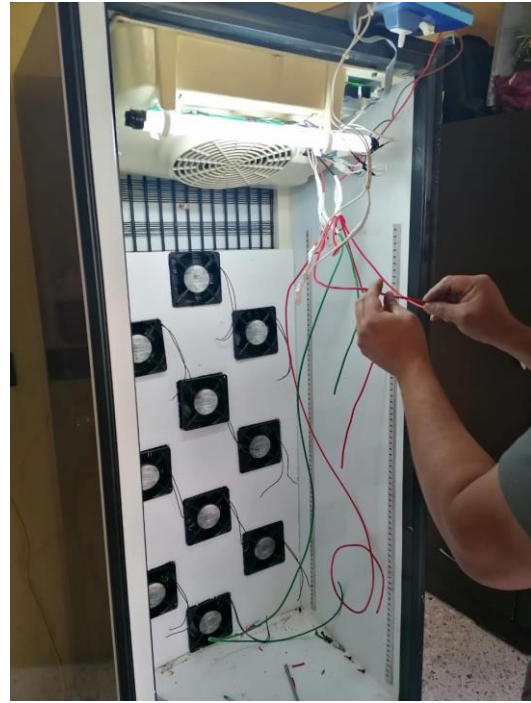


Figura 32 Instalación de sensores

Posteriormente se realizó el cambio de micro ventiladores por unos de alto flujo. Ilustración 33 y se realizaron las primeras pruebas con 3 rejillas. Ilustración 34



Figura 33 Cambio de ventiladores



Figura 34 Primeras pruebas con tres rejillas

Se adaptaron rejillas de aluminio dentro de la cámara de secado para evitar la contaminación del producto.

5.1.5 Pruebas de funcionamiento

Se realizaron las siguientes pruebas de funcionamiento con el equipo deshidratador asistido por bomba de calor, utilizando rodajas de manzana de 5 mm de grosor.

Se realizaron mediciones de la temperatura interna de la cámara de secado con el termostato electrónico general y del porcentaje de humedad relativa de la cámara cada 30 minutos.

Se tomaron como muestra tres rodajas por cada nivel dentro de la cámara de deshidratado para medir su grosor (mm), su peso (g) y temperatura (°C), utilizando un vernier, una báscula gramera y un termómetro de cocina de

aguja respectivamente; las mediciones se realizaron cada 30 minutos, durante 5 horas.

Obteniendo los siguientes resultados:

Cuadro 3 Medida de temperatura, peso y grosor de rodajas de manzana en el nivel 1

NIVEL 1											
HORA	RODAJA 1			RODAJA 2			RODAJA 3			TEMP AIRE	HR AIRE
	TEMPERATURA	PESO	GROSOR	TEMPERATURA	PESO	GROSOR	TEMPERATURA	PESO	GROSOR		
0.0	19.60	12.96	4.78	19.80	11.59	4.68	19.90	11.58	4.77	23.20	71.20
0.5	25.60	11.41	4.31	25.30	10.14	4.30	25.40	9.75	4.38	33.90	47.70
1.0	26.10	9.71	3.29	26.30	8.42	3.43	26.60	7.62	3.96	40.00	44.60
1.5	36.60	7.92	3.25	33.90	6.85	2.98	34.40	5.68	2.35	43.40	44.10
2.0	40.80	4.65	2.86	40.70	3.64	2.44	40.90	3.06	2.06	47.50	36.20
2.5	40.90	3.04	2.52	41.10	2.34	2.05	41.20	2.30	1.86	49.10	31.90
3.0	45.90	2.54	2.00	46.20	2.20	1.89	46.00	1.89	1.83	49.50	29.40
3.5	49.00	2.34	1.80	49.10	2.12	1.63	48.90	1.82	1.80	50.50	28.40
4.0	49.80	2.28	1.38	49.90	2.11	1.52	49.80	1.80	1.76	50.90	26.90
4.5	49.30	2.24	1.28	49.40	2.08	1.50	49.20	1.78	1.73	51.00	27.10
5.0	49.10	2.22	1.26	49.00	2.07	1.47	48.90	1.77	1.70	50.80	27.10

Cuadro 4 Medida de temperatura, peso y grosor de rodajas de manzana en el nivel 2

NIVEL 2											
HORA	RODAJA 1			RODAJA 2			RODAJA 3			TEMP AIRE	HR AIRE
	TEMPERATURA	PESO	GROSOR	TEMPERATURA	PESO	GROSOR	TEMPERATURA	PESO	GROSOR		
0.0	20.10	12.00	4.76	20.20	11.69	4.80	20.30	12.45	4.73	23.20	71.20
0.5	24.30	9.69	3.47	24.40	9.45	3.59	24.10	10.89	3.54	33.90	47.70
1.0	25.60	7.26	2.51	25.80	7.11	2.73	25.90	9.16	2.96	40.00	44.60
1.5	33.50	4.85	2.04	33.50	4.70	2.01	33.10	6.98	2.33	43.40	41.10
2.0	41.80	2.42	1.97	37.50	2.21	1.99	36.60	3.95	2.02	47.50	36.20
2.5	41.90	1.99	1.95	41.10	1.90	1.90	41.20	2.57	2.00	49.10	31.90
3.0	46.90	1.88	1.93	46.80	1.58	1.86	47.10	2.15	1.97	49.50	29.40
3.5	48.50	1.84	1.92	48.60	1.46	1.83	48.60	2.02	1.81	50.50	28.40
4.0	48.80	1.82	1.61	48.80	1.44	1.82	48.90	1.96	1.70	50.90	26.90
4.5	49.50	1.81	1.43	49.30	1.43	1.80	49.20	1.96	1.81	51.00	27.10
5.0	49.60	1.80	1.41	49.30	1.40	1.80	49.10	1.93	1.79	50.80	27.10

Cuadro 5 Medida de temperatura, peso y grosor de rodajas de manzana en el nivel 3

NIVEL 3											
HORA	RODAJA 1			RODAJA 2			RODAJA 3			TEMP AIRE	HR AIRE
	TEMPERATURA	PESO	GROSOR	TEMPERATURA	PESO	GROSOR	TEMPERATURA	PESO	GROSOR		
0.0	20.20	11.35	4.73	20.20	12.21	4.91	20.10	11.28	5.40	23.20	71.20
0.5	22.90	10.11	4.32	23.00	11.04	3.66	23.00	9.94	4.12	33.90	47.70
1.0	28.20	8.62	4.02	27.30	9.65	3.31	27.50	8.59	3.40	40.00	44.60
1.5	28.80	6.79	3.21	28.70	7.55	2.58	28.90	6.34	2.77	43.40	41.10
2.0	34.70	4.17	2.83	33.80	5.00	2.02	34.20	3.96	2.30	47.50	36.20
2.5	38.80	2.67	1.93	38.30	3.32	1.81	38.50	2.50	2.26	49.10	31.90
3.0	46.80	2.10	1.87	46.40	2.52	1.77	46.70	1.39	2.02	49.50	29.40
3.5	48.10	1.93	1.81	48.00	2.21	1.51	48.00	1.32	1.89	50.50	28.40
4.0	49.30	1.87	1.69	49.20	2.08	1.50	49.30	1.30	1.80	50.90	26.90
4.5	48.90	1.85	1.61	49.00	2.05	1.47	48.90	1.30	1.77	51.00	27.10
5.0	48.90	1.84	1.60	48.80	2.03	1.46	48.60	1.29	1.74	50.80	27.10

Se muestran a continuación, algunas imágenes del proceso de secado en el equipo deshidratador por bomba de calor y algunas pruebas de medición de temperatura, peso y grosor a las rodajas de manzana que fueron la muestra por cada nivel.



Figura 35 Medida del grosor en fresco



Figura 36 Acomodo en parrillas de aluminio



Figura 37 Nivel 1 dentro de la cámara de secado



Figura 38 Toma de temperatura en fresco



Figura 39 Peso de rodaja de manzana en la hora 2.5



Figura 40 Temperatura y humedad relativa general en la hora 3



Figura 41 Temperatura de rodaja en la hora 4

Durante el tiempo de secado (5 horas) se fue tomando una muestra de rodaja de manzana por nivel de secado cada cierto tiempo. La primera muestra que se tomó fue a los 80 minutos, la segunda se tomó a los 100 minutos, la tercera se tomó a los 120 minutos, la siguiente a los 150 minutos, la siguiente muestra se sacó de la cámara de deshidratado a los 180 minutos y la última muestra a los 300 minutos.

Cada toma de muestra se pesó, midió y registró su temperatura interna, para compararla al final con el secado al horno convencional, que utiliza la quema de gas LP para generar calor.

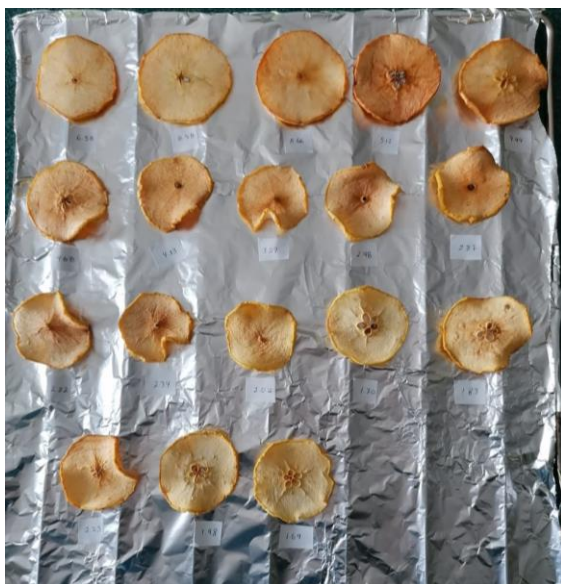


Figura 42 Muestras antes de ingresar al horno convencional



Figura 43 Muestras en el interior del horno convencional



Figura 44 Muestras al salir del horno convencional



Figura 45 Muestras embolsadas y etiquetadas



Figura 46 Muestra a los 80 minutos



Figura 47 Muestra a los 100 minutos



Figura 48 Muestra a los 120 minutos



Figura 49 Muestra a los 150 minutos



Figura 50 Muestra a los 180 minutos



Figura 51 Muestra a los 300 minutos

Se realizó la comparación de peso inicial (el peso que se obtuvo al sacar la muestra del deshidratador por bomba de calor) con el peso final (después de 60 minutos dentro del horno convencional). Obteniendo los siguientes resultados:

Cuadro 6 Secado al horno convencional de muestras a diferentes horas durante el proceso de deshidratado

SECADO HORNO A 160°C				
TIEMPO: 60 min				
TIEMPO	MUESTRA	PESO INICIAL(g)	PESO FINAL(g)	DIFERENCIA(g)
80 min	N1-A	6.58	1.93	4.65
	N2-B	8.58	2.28	6.30
	N3-C	8.66	2.68	5.98
100 min	N1-A	5.12	2.32	2.80
	N2-B	4.44	1.65	2.79
	N3-C	4.68	1.45	3.23
120 min	N1-A	4.33	1.52	2.81
	N2-B	3.59	1.39	2.20
	N3-C	2.48	1.53	0.95
150min	N1-A	2.87	1.55	1.32
	N2-B	2.82	1.69	1.13
	N3-C	2.34	1.41	0.93
180 min	N1-A	2.02	1.62	0.40
	N2-B	1.70	1.44	0.26
	N3-C	1.83	1.62	0.21
300 min	N1-A	2.23	1.96	0.27
	N2-B	1.98	1.71	0.27
	N3-C	1.69	1.48	0.21

Se puede observar que al finalizar el tiempo de secado (5 horas) la diferencia entre cantidad de humedad inicial y la cantidad de humedad final contenida en la manzana fluctuó entre 0.21 y 0.27 gramos. Se calculó que las rodajas de manzana contaban con alrededor del 12% de humedad residual después del proceso de deshidratado en el deshidratador por bomba de calor.

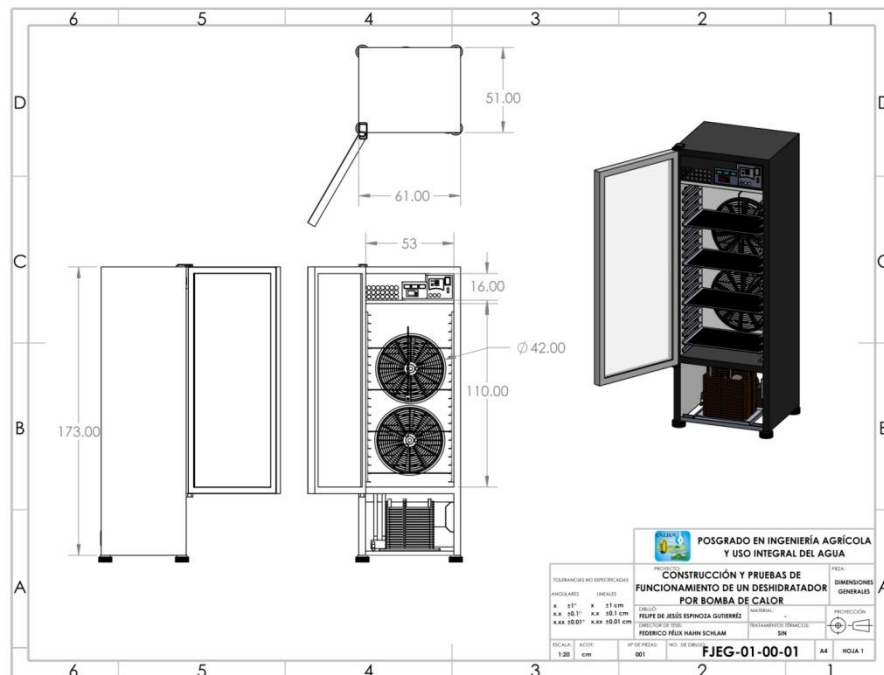


Figura 53 Medidas del equipo deshidratador asistido por bomba de calor



Figura 54 Modelo tridimensional del deshidratador asistido por bomba de calor

5.2 ARTÍCULO PUBLICADO: Automatic Sampling of Product Temperature and Moisture within a Heat Pump Apple Dryer



ISSN: 2643-6736



Advances in Robotics
& Mechanical Engineering

DOI: 10.32474/ARME.2021.03.000163

Research Article

Automatic Sampling of Product Temperature and Moisture within a Heat Pump Apple Dryer

Felipe Espinosa and Federico Hahn*

IAUIA Universidad Autonoma Chapingo, Texcoco México

*Corresponding author: Federico Hahn, IAUIA Universidad Autonoma Chapingo, Texcoco México

Received: November 17, 2021

Published: December 3, 2021

Abstract

Food losses in perishable fruits are present worldwide and in many cases half of the fruit harvested is lost. Drying is the oldest and most common food conservation process that increase product shelf life. However, some nutritional properties can be lost if dryer variables are not properly controlled. Heat pump drying (HPD) is useful for food products having high initial moisture as the dryer keeps the air relative humidity beneath 20%. A monitoring system was developed to check the homogeneity of each of the apple slices within a tray. The system touches all the slices within one row, before it moves to the next one. Product moisture was measured with a bifurcated optical fiber that acquired the 950nm and 800 nm wavebands and converted them to electrical signals with photodiodes. Surface plots show moisture measurements taken once the tray was inserted and two hours later.

Keywords: Heat Pump Dryer; Apple Slices; Moisture Fiber Optic Sensing; Product Temperature Sensing

Introduction

Half of all the fruit and vegetables produced worldwide are lost or wasted, representing 1.3 billion tons annually [1]. Fruit processing is becoming necessary to avoid its spoilage. Food dehydration is a common food conservation practice for increasing fruit shelflife. This technique maintains product sensorial attributes and can be easily transported worldwide after proper packing [2]. Drying removes free water from food reducing microbial spoilage and enzymatic reactions [3]. Food drying has been extensively studied in the last years trying to obtain high drying rates while maintaining product quality [4]. Energy consumption during drying has to be optimized, meanwhile fruit texture, flavor and chemical components persist [5]. Drying consumes 10-15% of the total industrial energy demand in Canada, France, and the USA [6]. Solar and hot air drying are the most common used methods due to their simplicity, but their performance is questionable due to long drying time and poor energy efficiency [5,7,8]. Total energy consumption in drying apple slices increased with air velocity and decreased with air temperature. Its energy efficiency varied from 2.87 to 9.11% [9]. Postharvest studies in the United States indicate that 8.6% fresh apples are lost at retail and 20% at consumer level [10]. Apple dehydration methods include solar, tunnel, microwave,

infrared and freeze drying [11]. Hot air circulates through trays enclosed in a cabin and the poor drying and energy efficiency depends on air speed and heaters [5-9,11,12]. High quality food use vacuum-microwave and Refractance Window drying [13] due to its better energy efficiency.

Heat pump technology has been used to dry food based on dehumidification/heating principles. Heat pump drying (HPD) has been found to be more effective in drying materials with high initial moisture and in very humid places [14]. Heat pump drying is now encountered in food industries due to its low energy consumption, minimum quality loss and high drying performance. HPD dries fruit with lower air temperature and relative humidity preserving heat-sensitive vitamins [15,16]. A system composed of a solar and a HPD dryer combination can be more efficient [17]. Solar drying can take place in daytime meanwhile heat pump drying can be effective at night. Fruit slices are introduced in trays and require from continuous temperature and moisture sampling. Single-point spectroscopy in the visible and near infrared region (Vis-NIR) [18] is a non-destructive technique used to monitor quality changes in the food industry. In a study carried out with mango it was found that at the 532 and 785 nm wavebands, moisture changes were detected

[19]. Reflectance to transmittance ratios in the photosynthetic domain at 555 nm represent a cost-effective alternative for water stress and quality estimation in maize [20]. The reflectance regions at 765–784 nm, and 950–957 nm is described as water absorption wavebands [21,22]. In this paper we describe an automatic system for sampling moisture and temperature of apple slices within a heat pump dryer. A mechanism was designed to move the sensors and measure both air and product variables.

Heat Pump Dryer

The block diagram of the heat pump dryer (Figure 1) shows the refrigerant cycle being its path highlighted by a blue line. The refrigerant components are a SM120S4VC scroll compressor, a condenser, an evaporator, and an expansion valve [17]. Airflow within the drying chamber circulates through the evaporator and the condenser as shown by the black line in Figure 1. Fans make airflow circulation possible.

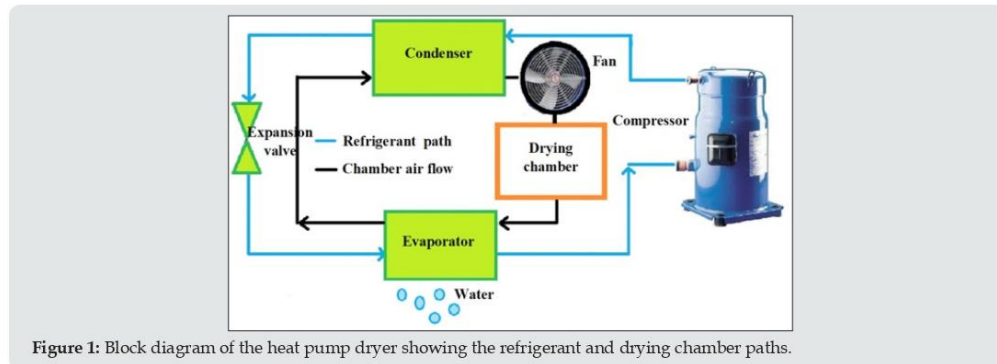


Figure 1: Block diagram of the heat pump dryer showing the refrigerant and drying chamber paths.

Air Temperature, Air Relative Humidity and Slice Temperature Sampling

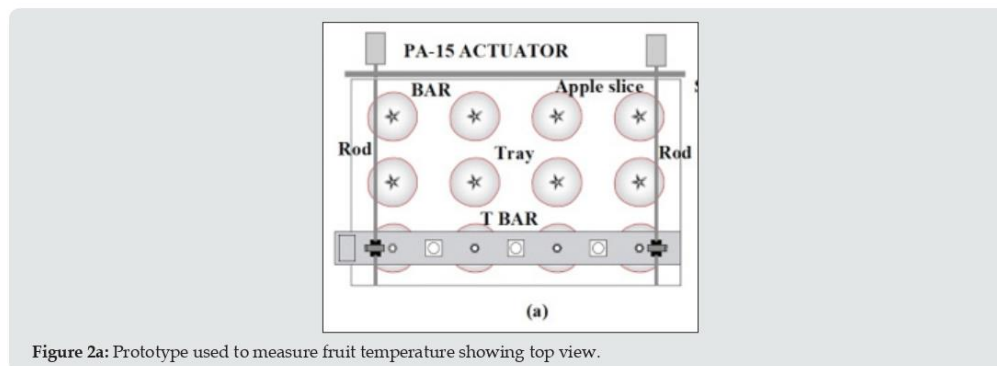


Figure 2a: Prototype used to measure fruit temperature showing top view.

Air temperature and relative humidity were measured with DHT22 sensors (Adafruit, Australia). The sensor uses a capacitive circuit to measure air humidity and a thermistor to measure temperature. There were 5 circuits installed inside the dryer hanging between the top bar (T BAR) and the bottom bar (B BAR), (Figure 2a). These circuits were connected through an I2C connection to an Arduino UNO microcontroller, sampling air variables every minute. Dryer control based on product temperature demands less energy than with air temperature control. Therefore, a prototype was designed to measure food temperature by contact using J type thermocouples (TS1-TS4). In Figure 2 only 4 thermocouples

are shown, but the prototype used five sensors per row. The main elements used by the automatic monitoring process were a linear actuator, three solenoids (S1-S3) and two rectangular bars separated by springs (SP1, SP2). The bottom bar has the thermocouples fixed (Figure 2b), and the metal rod plunger of the solenoids welded. After releasing the 120 V solenoids the sensors touch the apple slices and measure their temperature (Figure 2b). When the solenoids are energized, the bottom bar is lifted (Figure 2c) and the bars are free to move, letting a distance of 10 mm between the apple slices and thermocouples. A linear actuator (PA 15, Progressive Automations, USA) with a 12 V brushed DC

motor was employed to move the thermocouple bar back and forth. Apple slices measurements were done automatically and uses a microcontroller (Arduino UNO) to provide sampling time and actuator voltage. When the T BAR is over the 5 apple slices of the first row and the solenoids are turned-off, the J-thermocouples touch the slices (Figure 2b, Figure 3). The springs will maintain the bottom bar (BBAR) down and temperature measurements of five slices are taken simultaneously at the first row. After 10 seconds,

energy is supplied to the solenoids lifting the BBAR. A voltage pulse is applied to the PA-15 actuator until it arrives to the second row of apple slices, being the sampling process repeated. An optical sensor was developed (Figure 4a) to detect moisture in apple slices. Two hundred samples were acquired from random apple slices using a Vis-NIR spectrometer (USB2000+, Ocean Optics Inc. USA). After analyzing the spectral signatures with discriminant analysis, the best wavebands for moisture detection were 950 nm and 800 nm.

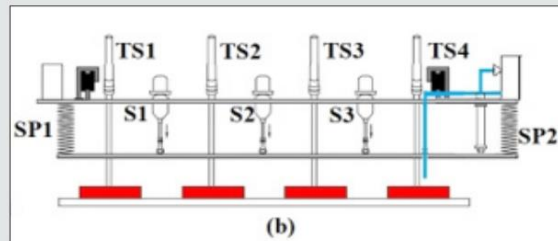


Figure 2b: Prototype used to measure fruit temperature showing lateral view with released solenoids.

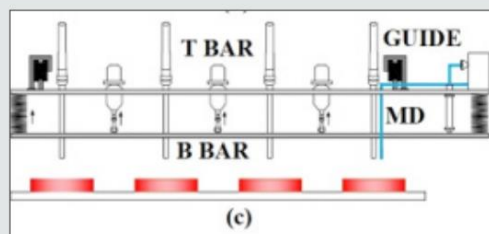


Figure 2c: Prototype used to measure fruit temperature showing lateral view after solenoids activation.

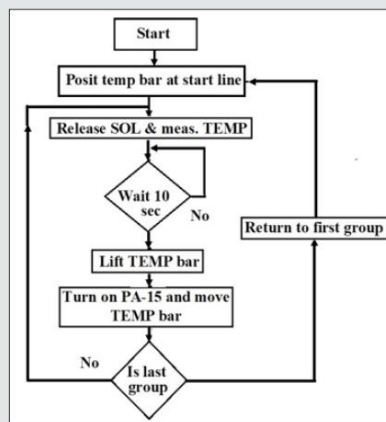
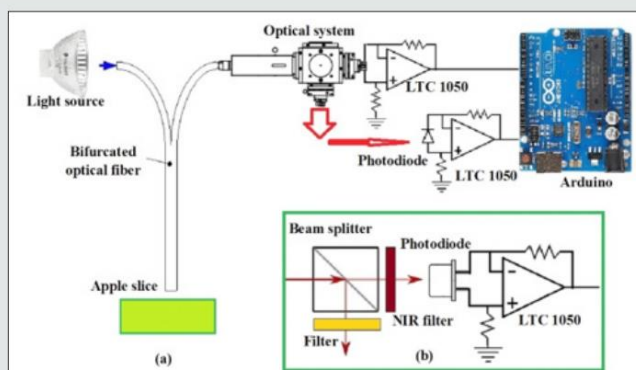


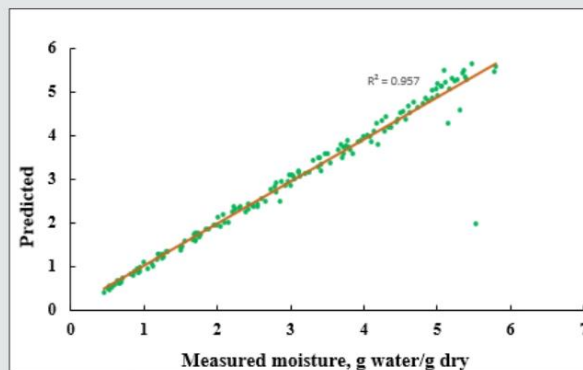
Figure 3: Flowchart for synchronous product temperature measurement.

A light source illuminates the bifurcated optical fiber system at one end and reflected light from the sample is obtained at the other fiber end (Figure 4a). The reflected light arrives to a NIR beam splitter (mod 47-123, Edmund Scientific, USA), that outputs two identical 50R/50T reflectance and transmission optical beams (Figure 4b). Each beam is filtered by a band pass filter (mod 65-118 for 800 nm and mod 88-569 for 950 nm, Edmund Scientific, USA). The optical information is directed to photodiodes and converted to electrical signals. After amplifying the photodiode signals with two precise, zero-drift operational amplifiers (LTC1050,

Linear Technology Inc., USA) it is acquired by an Arduino UNO microcontroller and saved in memory. The PIN photodetector (PS7-5, First Sensor Inc., USA) was used for 800 nm detection, meanwhile a precise PIN photodiode (S1223, Hamamatsu Inc., Japan) detected the 950 wavebands. Two hundred apple samples were measured at different drying stages with the optical sensor, weighted with a balance and then dried in an oven to obtain the dry weight without water. A linear curve resulted between real and optical moisture measurements having a R^2 of 0.957 (Figure 5).



Figures (4a,4b): Optical fiber sensor (a) detects apple slice moisture, being (b) composed of a beam splitter, filters, and photodiodes.



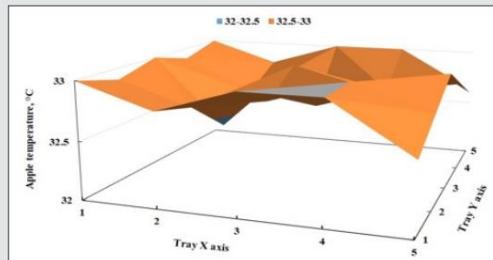
Figures 5: Optical fiber sensor measurement correlated apple slice moisture given in grams of water against grams of dried solid content.

Results

Apple slices 6 mm thick were cut filling three trays of the HPD dryer. Only the top tray was monitored as the surface over it let a space for the prototype movement. Air temperature was of 40°C and

air relative humidity 20%. These measurements were taken with the DTH22 sensors and were constant during the entire 250 min drying time. Temperature measurements taken with the prototype showed apple slice variations after 90 minutes of drying (Figure 6). Temperature of the 25 slices varied from 32.4 to 33°C. The X and Y

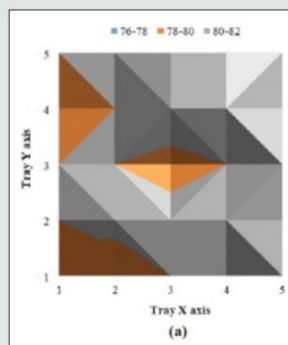
axis number represents the slice number given in cartesian format (1,1; 3,4). The first case (1,1) represents the apple slice in the first row, being at left position. The second case (3,4) shows the middle apple slice (3) of the fourth row.



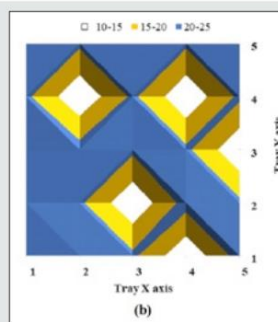
Figures 6: Temperature apple slices surface plot.

Optical fiber and photodetectors have been used to monitor chemical concentrations [22]. Optical moisture measurements were taken to 25 samples positioned over the top tray. Once the dryer was hot and the trays introduced, the 25 apple slices of the top tray had moisture content values between 76 and 78% (Figure

7a). After drying for 120 minutes, the slices reduced their moisture content considerably to values within 18 and 22% (Figure 7b). The slices at (2,4; 3,2 and 4,4) were smaller and shrunk quickly [23]; optical measurements were not taken over the fruit surface and their values were below 11% [24].



Figures 7a: Moisture area plot of apple slices just introduced to the HPD dryer.



Figures 7b: Moisture area plot of apple slices two hours later.

Conclusion

This work shows an automatic system for drying apple slices. It measures temperature and moisture content of the fruit during the drying process as it can provide a better signal for energy-efficient dryers. The system can include more thermocouples and use instead infrared sensors avoiding solenoid lifting and releasing. The moisture optical sensor used 800 nm and 950 nm waveband filters. The optical sensor can be transformed to measure another fruit nutrients during drying by changing the waveband of the filters.

Acknowledgements

We would like to acknowledge all the technical staff of the University that provided funding to build the prototype. As well we would like to thank MI Angel Hernandez Facundo for his help in the development of all the drawings.

References

1. Porat R, Lichter A, Terry LA, Harker R, Buzby J (2018) Postharvest losses of fruit and vegetables during retail and in consumers' homes: Quantifications, causes, and means of prevention. *Postharvest Biology and Technology* 139: 135-149
2. Noori AW, Royen MJ, Haydary J (2019) An active indirect solar system for food products drying. *Acta Chimica Slovaca* 12(1): 142-149.
3. Akharume F, Singh K, Jaczynski J, Sivanandan L (2018) Microbial shelf stability assessment of osmotically dehydrated smoky apples. *LWT* 90: 61-69.
4. Royen MJ, Noori AW, Haydary J (2020) Experimental Study and Mathematical Modeling of Convective Thin-Layer Drying of Apple Slices. *Processes* 8(12): 1562.
5. Antal T (2015) Comparative study of three drying methods: freeze, hot air- assisted freeze and infrared-assisted freeze modes. *Agronomy research* 13(4): 863-878.
6. Motevali A, Minaei S, Banakar A, Ghobadian B, Khoshtaghaza MH (2014) Comparison of energy parameters in various dryers. *Energy Conversion and Management* 87: 711-725.
7. Feng H, Tang J (1998) Microwave finish drying of diced apples in a spouted bed. *Journal of Food Science* 64(4): 679-683.
8. Sharma A, Chen CR, Lan NV (2009) Solar-energy drying systems: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13(6): 1185-1210.
9. Beigi M (2016) Energy efficiency and moisture diffusivity of apple slices during convective drying. *Food Science and Technology* 36(1).
10. Buzby JC, Hyman J, Stewart H, Wells HF (2011) The value of retail and consumer level fruit and vegetable losses in the United States. *J Consum Aff* 45: 492-515.
11. Nunes C, Ribeiro T, Nunes J (2015) Comparative Analysis of Dehydration Methods for Apple Fruit. *Revista de Ciencias Agrarias* 38: 282-290.
12. Rasooli Sharabiani V, Kaveh M, Abdi R, Szymanek M, Tanaš W (2021) Estimation of moisture ratio for apple drying by convective and microwave methods using artificial neural network modeling. *Scientific Reports* 11: 9155.
13. Ozan Kahraman O, Malvandi A, Vargas L, Feng H (2021) Drying characteristics and quality attributes of apple slices dried by a non-thermal ultrasonic contact drying method. *Ultrasonics Sonochemistry* 73: 105510.
14. Sosle V, Raghavan GSV, Kittler R (2001) Experiences with a heat pump dehumidifier assisted drying system. *Proc 1st Nordic Drying Conference Trondheim Norway*.
15. Hawlader MNA, Perera CO, Tian M (2006) Properties of modified atmosphere heat pump dried foods. *Journal of Food Engineering* 74(3): 392-401.
16. Salehi F (2021) Recent Applications of Heat Pump Dryer for Drying of Fruit Crops: A Review. *International Journal of Fruit Science* 21(1): 546-555.
17. Aktaş M, Ceylan İ, Yilmaz S (2009) Determination of drying characteristics of apples in a heat pump and solar dryer. *Desalination* 239(1-3): 266-275.
18. Ren G, Chen F (1997) Determination of moisture content of ginseng by near infra-red reflectance spectroscopy. *Food Chemistry* 60(3): 433-436.
19. Romano G, Nagle M, Müller J (2016) Two-parameter Lorentzian distribution for monitoring physical parameters of golden colored fruits during drying by application of laser light in the Vis/NIR spectrum. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 33: 498-505.
20. Baranoski GVG, Van Leeuwen SR (2017) Detecting and monitoring water stress states in maize crops using spectral ratios obtained in the photosynthetic domain. *Journal of Applied Remote Sensing* 11(3): 036025.
21. Zhang Q, Li Q, Zhang G (2012) Rapid Determination of Leaf Water Content Using VIS/NIR Spectroscopy Analysis with Wavelength Selection. *Journal of Spectroscopy* 27: 1D 276795.
22. Chandel NS, Rajwade YA, Golhani K, Tiwari PS, Dubey K, Jat D (2020). Canopy spectral reflectance for crop water stress assessment in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Irrigation and Drainage* 70: 321-331.
23. Pérez MA, González O, Arias JR (2013) Optical fiber sensors for chemical and biological measurements. In *Current Developments in Optical Fiber Technology*. IntechOpen, London, UK, Chapter 10: 265-291.
24. Mbarek R, Mihoubi D (2019) Development of Physical Properties of Apple during Dehydration. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering* 63(4): 591-599.



This work is licensed under Creative Commons Attribution 4.0 License

To Submit Your Article Click Here:

[Submit Article](#)

DOI: 10.32474/ARME.2021.03.000163



Advances in Robotics & Mechanical Engineering

Assets of Publishing with us

- Global archiving of articles
- Immediate, unrestricted online access
- Rigorous Peer Review Process
- Authors Retain Copyrights
- Unique DOI for all articles