EIEI ACOFI 2025
5º Congreso Latinoamericano de Ingeniería
Más Información: www.acofi.edu.co/eiei
Ingeniería de impacto para cuidar y transformar la vida
ACOFI: 50 años por la excelencia de la educación en ingeniería.

Equipo experimental para el estudio y modelado de procesos agroindustriales orientados a la deshidratación de alimentos

[1]Mauricio Castellanos, [1]Yesid Javier Rueda Ordóñez, [2]Ariel René Carreño Olejua

[1]Universidad Industrial de Santander, Colombia
[2]Corporación Colombiana para la Investigación Agropecuaria, Colombia

Resumen

La implementación de procesos alternativos de poscosecha agroindustrial concebidos para el mejoramiento de la calidad, la extensión de la vida útil, o la reducción del consumo de energía va de la mano del estudio, caracterización y evaluación de los efectos en múltiples propiedades físicas, químicas y biológicas del producto de interés. Los enfoques netamente experimentales para cumplir con este último propósito pueden resultar extremadamente demandantes en términos de tiempo y recursos materiales, de modo que las herramientas matemáticas y computacionales para la simulación y control de procesos agroindustriales revisten particular importancia, especialmente cuando se articulan convenientemente con resultados experimentales obtenidos a partir de dispositivos de laboratorio diseñados para su validación.

Este trabajo presenta los resultados obtenidos en el desarrollo de una unidad de secado diseñada como herramienta para el estudio científico y el modelado matemático-computacional de procesos de deshidratación de productos de las cadenas agrícolas como el cacao y la guayaba, priorizados en la región de Santander (Colombia).

Inicialmente, se discuten las generalidades de la metodología de diseño adoptado, fundamentado en el estado del arte de los fenómenos de deshidratación de materiales biológicos y en las características de los medios experimentales necesarios para la obtención de datos relevantes y confiables de las variables de interés.

A partir del modelo conceptual de la herramienta desarrollada, se evalúan sus sistemas y componentes, y la forma en la cual se integran con las distintas configuraciones de trabajo. Lo anterior, dado que el dispositivo permite controlar múltiples factores asociados al secado de alimentos, tales como velocidad, temperatura y humedad de aire, así como la temperatura superficial de fuentes radiantes. De igual modo, teniendo en cuenta las estrategias de modelado y de caracterización de alimentos, se describen los sistemas de control, supervisión y adquisición de

DOI: https://doi.org/10.26507/paper.4296

datos implementados que permiten hacer un seguimiento de temperaturas de muestras, temperaturas de superficies de interés, humedad relativa del aire y peso de muestras. Por otra parte, se describen las herramientas informáticas especializadas para la configuración de las bases de datos que se acceden en las etapas de posprocesamiento de información.

Finalmente, se presentan los resultados experimentales obtenidos con algunos productos agrícolas.

Palabras clave: equipos experimentales; modelos matemáticos; secado de alimentos

Abstract

The implementation of alternative agro-industrial post-harvest processes designed to improve quality, extend shelf life, or reduce energy consumption goes hand in hand with the study, characterization, and evaluation of the effects on multiple physical, chemical, and biological properties of the product of interest. Purely experimental approaches to achieve this latter purpose can be extremely demanding in terms of time and material resources, so mathematical and computational tools for the simulation and control of agro-industrial processes are of particular importance, especially when they are conveniently articulated with experimental results obtained from laboratory devices designed for their validation.

This work presents the results obtained in the development of a drying unit designed as a tool for the scientific study and mathematical-computational modeling of dehydration processes of products from agricultural chains such as cocoa and guava, prioritized in the Santander region (Colombia). Initially, the generalities of the adopted design methodology are discussed, based on the state of the art of dehydration phenomena of biological materials and the characteristics of the experimental setups necessary for obtaining relevant and reliable data of the variables of interest.

Based on the conceptual model of the developed tool, its systems and components are evaluated, as well as the way they integrate with the different working configurations.The above is due to the fact that the device allows controlling multiple factors associated with food drying, such as air speed, temperature, and humidity, as well as the surface temperature of radiant sources.Similarly, taking into account the strategies for modeling and characterizing food, the implemented control, monitoring, and data acquisition systems are described, which allow for tracking sample temperatures, surface temperatures of interest, relative humidity of the air, and sample weight.On the other hand, specialized computer tools for configuring databases that are accessed during the information post-processing stages are described.

Finally, the experimental results obtained with some agricultural products are presented.

***Keywords**: experimental equipment; mathematical models; food drying*

INTRODUCCIÓN

Colombia ha venido planteando estrategias para impulsar el desarrollo agroindustrial del país, configurando un marco orientador que permita garantizar las seguridad alimentaria de las regiones, incrementar la productividad y competitividad de las cadenas agrícolas, promover sistemas productivos ambientalmente sostenibles y fortalecer el capital social y las capacidades del sistema nacional de innovación agropecuaria (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria et al., 2016). Las estrategias allí consignadas se conjugan especialmente con el desarrollo de procesos de postcosecha de productos alimenticios para garantizar su innocuidad, prolongar el tiempo de conservación y mantener los atributos de calidad (color, aroma, sabor, composición química, textura, etc.). Debido al impacto que tienen los procesos de secado en la mayoría de los aspectos antes mencionados, existe una necesidad evidente de profundizar en las bases de conocimiento relacionadas con la tecnologías existentes, y como estas pueden mejorarse de cara a los retos actuales de la humanidad (Guo et al., 2024).

En este sentido, la investigación orientada al secado de alimentos se enfoca actualmente, entre otras áreas, en la optimización de los procesos, la retención de nutrientes, la sostenibilidad, y la calidad del producto final. Todas ellas se ven potenciadas gracias a la incorporación de modelos matemáticos y herramientas computacionales para evaluar el impacto de las variables fundamentales de los procesos convencionales: Temperaturas, humedades y velocidades (Kilic et al., 2024).

Un aspecto clave a tener en cuenta es que el modelado matemático requiere datos experimentales para validar y establecer si se consigue una representación adecuada del fenómeno que se pretende describir (Malekjani & Jafari, 2018). Por tanto, la información experimental requerida depende en gran medida de las escalas espaciales y temporales en las que ocurre el secado, las fases presentes en el medio que se seca, y los procesos de transporte de energía, masa y momento involucrados (Defraeye, 2014; Welsh et al., 2018).

Este es uno de los aspectos por los que los materiales y métodos divulgados en la literatura son tan diversos y especializados (Kilic et al., 2024). Sin embargo, si se tienen en cuenta aquellos casos en los que se quiere hacer ajuste de modelos empíricos de la cinética de secado, o cuando el enfoque del modelo computacional es de tipo macroscópico, se puede configurar un dispositivo que permita evaluar múltiples productos y tipos de muestras. Estos modelos también resultan más ventajosos cuando se trata de optimizar secadores o procesos de secado; o cuando el objetivo es predecir el contenido de humedad de un producto o su temperatura promedio durante la deshidratación (Akter et al., 2022).

En consecuencia, los secadores de laboratorio convectivos tipo gabinete son los más utilizados. En ellos, las muestras de producto son ubicadas en bandejas o un porta muestras, incluyendo en algunos casos un sistema de medición directa del peso cuando se quiere registrar esta variable de manera continua (Nirmaan et al., 2020; Wang et al., 2024). Así mismo, se adaptan convenientemente para incorporar diferentes fuentes de energía dependiendo del estudio a realizar (generador de microondas o lámparas infrarrojas, por ejemplo)(Huang et al., 2021; Onwude et al., 2018).

El otro tipo de secadores experimentales ampliamente utilizado son los tipos túnel, especialmente útiles cuando se varían en un amplio rango las condiciones de temperatura, humedad relativa y velocidad promedio del aire de secado sobre las muestras. Normalmente estos equipos son hechos a la medida, y permiten incorporar fuentes de energía combinadas, y múltiples sensores para las variables de interés (Catalkaya et al., 2023; Onwude et al., 2016; Tzempelikos et al., 2014). Así mismo, en gran parte de los casos los equipos son parametrizados para operar en los intervalos de temperatura, humedad y velocidad de aire asociados a el producto que se estudia, de manera que se puedan utilizar actuadores, sensores, sistemas de adquisición y control de baja complejidad y costo. En este sentido, la incorporación de hardware robusto y software especializado permite de una parte, ampliar los rangos de operación de las variables de interés para realizar estudios con diferentes productos agroindustriales, y de la otra, implementar procesos de secado combinado con diferentes fuentes de energía (Aghilinategh et al., 2015; Jaturonglumlert & Kiatsiriroat, 2010).

En consideración de lo anterior, y como parte de los entregables del proyecto "Fortalecimiento de las capacidades den Ciencia, tecnología e innovación del Centro de Investigación La Suiza para el desarrollo de proyectos de fitosanidad y agroindustria en sistemas de producción priorizados en el departamento de Santander", financiado por el Sistema general de regalías de Santander, se desarrolló una unidad experimental acondicionadora de aire de secado, como soporte a la investigación de los procesos productivos agroindustriales, especialmente de alimentos. Su concepción básica permite no solamente el estudio de los procesos de deshidratación de muestras de cacao y guayaba, los cuales fueron los cultivos priorizados por el proyecto. La unidad experimental cuenta con características que le permiten incorporar diferentes productos y estrategias de secado en la zona de pruebas, así como un sistema de acondicionamiento de aire de secado automatizado, para controlar la temperatura de bulbo seco, la humedad relativa del aire, y la velocidad media del aire en la sección de pruebas.

MARCO DE REFERENCIA

Los secadores experimentales tipo túnel tienen características particulares que los hacen apropiados para estudiar el secado convectivo de alimentos. De manera simple, las teorías sobre los procesos de deshidratación de materiales biológicos señalan que el agua que contiene el material de manera concentrada (no ligada a la fase sólida) es transferida al aire de secado gracias a la existencia de gradientes de la presión de vapor. La presión de vapor en el material está relacionada con la actividad del agua (a_w), que es la razón entre la presión parcial del vapor en equilibrio con el material biológico y la presión parcial del agua pura a la misma temperatura (International Commission of Agricultural Engineering, 1999).

Por otra parte, la facilidad con la que un material se deshidrata está relacionado con la manera en que el agua se asocia con la matriz sólida. Cuanto más compacto y molecularmente unido el material, es más difícil retirar la humedad. Si el enlace es de tipo químico, es necesario calentar a temperaturas extremadamente altas, o se debe producir una reacción química. De manera análoga, si el enlace es fisicoquímico (humedad ligada) el agua se encuentra dentro de microcapilares y puede retirarse mediante prensado. Si el enlace es fisicoquímico (humedad ligada), el contenido de agua se mantiene dentro del material por fuerzas osmóticas y se puede transferir por medio del

secado convectivo. Sin embargo, cuando la humedad ligada se encuentra retenida sobre la superficie y los poros del material por fuerzas de adsorción, es de difícil remoción por medios convencionales (Srikiatden & Roberts, 2007).

Ahora bien, el mecanismo de transporte de humedad involucrado en el gran conjunto de soluciones tecnológicas que utilizan túneles de secado para la evaluación de las estrategias de secado es la evaporación superficial, en la que, bajo la acción de aire seco, el agua del material es evaporada y transferida, siempre y cuando la presión parcial del agua en el material sea superior que la presión parcial del agua en el aire. (Lingayat et al., 2022). Los túneles de secado permiten medir y controlar con precisión las variables que gobiernan el transporte de humedad interfacial por medios convectivos (Ahmed, 2013). Involucra parámetros físicos como la temperatura, humedad y velocidad del aire, contenido de humedad y temperatura de las muestras, temperaturas de medios externos de calentamiento si los hay, y debe permitir la evaluación de variables fisicoquímicas de interés como color, volumen, estructura interna del material, compuestos orgánicos, e incluso el perfil sensorial del producto. La tabla 1 presenta una relación de las cantidades físicas que un equipo experimental debe controlar y/o supervisar durante una prueba de secado.

Tabla 1. Relación de variables controladas o supervisadas por una unidad experimental.

Cantidad de interés [Unidades]	Producto	Aire	Componente Equipo
Temperatura [C]	•	•	•
Humedad relativa [-]		•	
Velocidad promedio [m/s]		•	
Peso [gm]	•		
Color [RGB]	•		
Area [m2]	•		
Potencia eléctrica [kW]			•
Presión hidrostática [psi]			•

De igual manera, los análisis asociados a las muestras deshidratadas se presentan en la tabla 2. El análisis es parcial si las muestras se extraen y regresan a la unidad experimental; o final, si son retiradas definitivamente.

Tabla 2. Relación de posibles análisis de las muestras agroindustriales deshidratadas.

Descripción del análisis	Final	Parcial
Medición de dimensiones principales		•
Análisis colorimétrico		•
Contenido de humedad de equilibrio	•	
Contenido de ácidos grasos	•	
Contenido de polifenoles totales	•	
Contenido de carbohidratos	•	
Estructura microscópica	•	
Peso en base seca	•	
Conductividad térmica	•	
Capacidad térmica especifica	•	
Perfil sensorial	•	

A partir de las variables controladas y los posibles análisis de las muestras deshidratadas, se pueden establecer los requerimientos del diseño de la unidad experimental (Véase Tabla 3).

Tabla 3. Requerimientos para el diseño de un equipo experimental para caracterización del secado.

Requerimiento	Obligatorio	Deseable
Control y supervisión de la temperatura del aire de proceso	•	
Control y supervisión de la humedad relativa del aire de proceso	•	
Control y supervisión de la velocidad del aire dentro de la unidad	•	
Supervisión de la temperatura de la muestra	•	
Supervisión del peso de la muestra	•	
Sistema de visualización de la evolución de las variables de proceso		•
Sistema para el control de la temperatura de la muestra		•
Sistema de adquisición de imágenes de las muestras		•
Sistema de control de calentamiento directo de las muestras		•
Mecanismo para fijación de muestras	•	
Sistema de fácil acceso a la zona de deshidratación	•	
Materiales resistentes a la corrosión y compatibles con alimentos	•	
Sistema de circulación y renovación de aire		•
Aislamiento térmico externo de los componentes		•
Registro del consumo de energía eléctrica de los componentes		•
Sistema de recirculación de aire de secado y ajuste fino de variables	•	
Acondicionamiento del aire de proceso con energías alternativas		•

EQUIPO EXPERIMENTAL DESARROLLADO

El modelo conceptual que permitió el dimensionamiento, selección y construcción del equipo se muestra en la figura 1. Los dos subsistemas básicos de control de las variables de proceso involucran procesos de humidificación con agua pulverizada y un sistema de calentamiento sensible con un banco de resistencias eléctricas. Las muestras se disponen en la cámara de secado que involucra la instrumentación básica para hacer seguimiento a las variables físicas de interés. Por otra parte, la velocidad del aire en la sección de pruebas es controlada con un ventilador axial.

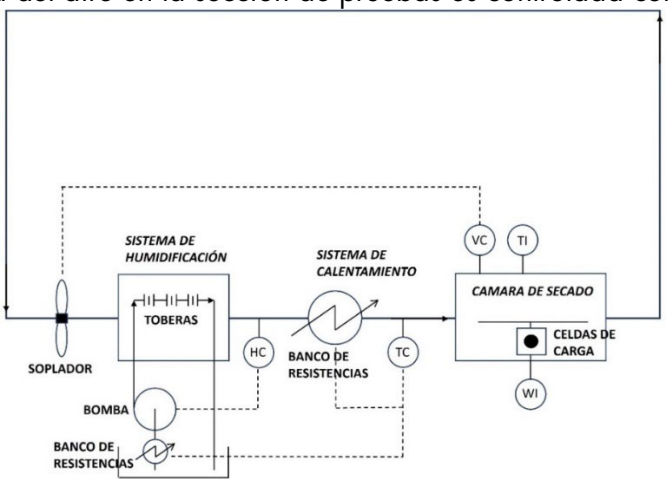


Figura 1. Modelo conceptual de la unidad experimental propuesta.

La zona de pruebas y de todas las secciones tubulares rectas del equipo son de 30[cm]x30[cm]. Las secciones horizontales que conforman el anillo cerrado tienen 3.6[m], y las secciones verticales tienen aproximadamente 60[cm]. Los ductos se fabricaron con lámina de acero galvanizado calibre 20(espesor=0.92[mm]). La unidad de secado está fabricada con lámina de acero inoxidable, e instrumentada con sensores de temperatura y humedad del aire, y celdas de carga para registrar el peso de las muestras. La unidad de calentamiento consta de un banco de resistencias eléctricas en U, mientras que la unidad humidificadora incluye un tanque de agua, un sistema presurizado de recirculación, y un distribuidor con toberas para aspersión del agua (0.4[mm] de diámetro).

Todas las variables de proceso son ajustadas electrónicamente mediante un controlador lógico programable (PLC), una unidad de cómputo para procesos industriales, y software especializado. En el equipo se pueden configurar múltiples combinaciones de las variables de proceso para evaluar no solo la cinética del proceso de deshidratación, sino el efecto de las propiedades del aire y los parámetros del secado en términos de los atributos sensoriales y físicos, el contenido de humedad de compuestos químicos de interés, y el consumo específico de energía para alcanzar un valor de humedad promedio dado.

El control de la velocidad del aire se realiza en el intervalo de 0.03[m/s] a 3.4[m/s], gracias a un variador de frecuencia conectado al motor eléctrico del ventilador. La rutina de control se validó usando como referencia en el estándar ISO3966 para la medición del flujo en conductos cerrados (Caré et al., 2014), utilizando mediciones de un anemómetro de hilo caliente calibrado.

Por otra parte, las condiciones de humedad del aire de secado se alcanzan mediante una rutina automática basada en el método de las dos temperaturas que utiliza la temperatura de bulbo seco del aire y su humedad relativa para ajustar la potencia eléctrica de las resistencias de calentamiento (Lin et al., 2005). El proceso inicia con el calentamiento del agua en el depósito cerca de la temperatura de rocío del aire con el que se realizarán las pruebas de secado. Cuando se alcanza esta condición, se dispersa agua con las toberas y paulatinamente la temperatura del aire comienza a elevarse hasta que se alcanza la temperatura del agua de humidificación. Alcanzado este punto se detiene la humidificación, y se adiciona calor sensible para fijar las condiciones de humedad relativa deseadas. En la práctica, la temperatura del agua de humidificación debe ser ligeramente inferior a la temperatura de rocío del aire (0.1[C] por cada grado de diferencia entre la temperatura de bulbo seco y de rocío).

Durante las pruebas, la unidad electrónica de control realiza el seguimiento continuo de la temperatura y la humedad del aire con un sensor termo-higrométrico instalado aguas arriba de la unidad de secado. De esta manera, se pueden realizar ajustes finos de las variables controladas si es necesario. En este sentido, la tabla 4 relaciona la información técnica de cada uno de ellos.

Tabla 4. Especificaciones de los sensores instalados en la sección de secado

Sensor	Referencia	Fabricante	Rango	Precisión	Resolución
Celdas de carga	AS220X2	Radwag, USA	220[g]	± 02[g]	0.1[mg]
Termohigrometro	EE210P-HTCB	Sensovant, España	T: -40[°C],80[°C] RH: 0 %,100 %	± 0.2[°C] ± 2.5%RH	0.0043[°C] 0.0036 %

Termocuplas muestras	Tipo k 0.4[mm]	Taizhou electric	-270[°C],1100[°C]	±1[°C]	-
Termocuplas superficies	Tipo k 1[mm]	Taizhou electric	-270[°C],1100[°C]	±1[C]	-
Termómetro infrarrojo	CT-LT 22:1 optics 8-14μm	Optris	-58[°C],975[°C]	±1%	-

PARAMETRIZACIÓN Y AUTOMATIZACIÓN

Para el calentamiento del agua de humidificación se utiliza un lazo de control con una termocupla conectada al módulo de entradas analógicas del PLC. Por su parte, el calentamiento del aire emplea 6 resistencias de 1000[W] que se van accionando de manera escalonada según sea requerido. El lazo de control para ajustar la velocidad del aire con el variador de frecuencia se conecta al PLC vía Profibus. La configuración de las variables que hacen parte de la rutina de control implementadas se presenta en la tabla 5.

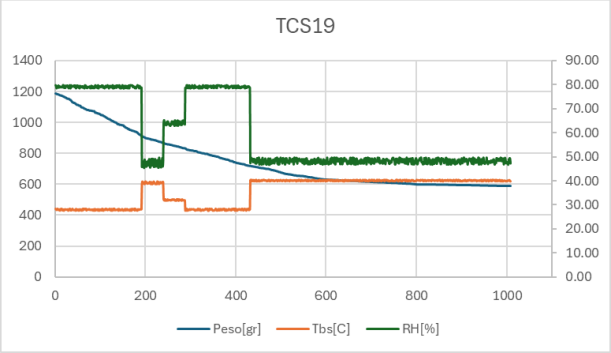
La estructura de la programación sigue los lineamientos de la norma DIN61131 en el software SIEMENS TIA V.17, con una arquitectura en la que se configuran programas de organización, bloques de función y bloques de datos ordenados en una estructura de control y supervisión, que involucra lectura de datos de proceso, análisis de datos de proceso y escritura de datos de proceso. El análisis de datos de proceso tiene por objetivo evaluar cada una de las variables de respuesta en el sistema de control, y da como resultado valores de ajuste de proceso para corregir o mantener las condiciones fijadas (v.gr. lazo de control de temperatura de agua de humidificación de aire, que actúa sobre la frecuencia de accionamiento de la resistencia eléctrica para mantener, aumentar o disminuir para ajustarse a un valor deseado previamente fijado por el experimentador). La escritura de datos para control del equipo involucra operaciones de escalamiento y transformación de valores digitales para su almacenamiento en bloques de escritura en los diferentes módulos de salidas digitales o análogas.

RESULTADOS

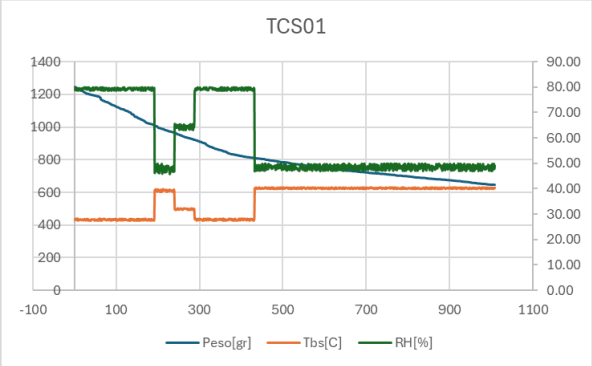
A partir del diseño de detalle, de los lineamientos y de las especificaciones mostradas anteriormente se efectuó la construcción del equipo. Las secciones de ductos que conforman el anillo de secado fueron construidas por una empresa contratista del sector de la refrigeración y aire acondicionado; mientras que los sensores, instrumentación, hardware y software fueron adquiridos con proveedores nacionales y extranjeros. La fotografía mostrada en la figura 4 muestra detalles de las secciones de humidificación, calentamiento y secado del equipo experimental.

Dentro de los experimentos preliminares, se efectuó el registro continuo de las señales de los sensores de temperatura y humedad del aire, así como del peso de muestras de cacao de las variedades TCS01 y TCS19 (Teobroma Centro de investigación La Suiza). Aquí se dispuso baches de granos fermentados de aproximadamente 1.2[kg] cada uno y se registró la evolución del peso versus temperatura y humedad del aire en la unidad de secado. Las curvas de la figura 5 constituyen

el insumo básico para la construcción de las curvas de cinética del proceso de deshidratación. Tal y como son adquiridas inicialmente por el equipo, se configura el registro de las variables de interés con una diferencia de tiempo establecida. Para el caso de las figuras mostradas, cada registro se tomo con un intervalo de 5 minutos. Este es un aspecto que puede configurarse en el sistema de control de acuerdo con las características del producto a deshidratar y a los parámetros de secado establecidos.



a) *Variedad TCS19*



b) *Variedad TCS01*

Figura #. Evolución de las variables de proceso

Por otra parte, la curva mostrada en la figura 5 muestra la rampa de control de la temperatura del aire entre 28[C] y 40[C], y la evolución del contenido de humedad en base seca de granos de cacao de la variedad TCS06, desde un valor inicial de 48%, hasta un valor final de 4.5%.

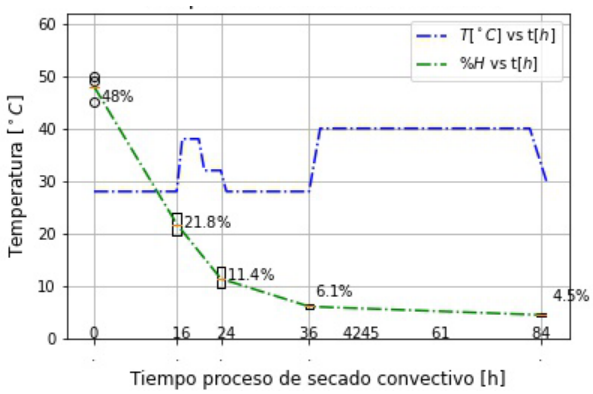


Figura 5. Curva de secado y rampa de temperatura del aire de secado

CONCLUSIONES

El equipo desarrollado permitirá el estudio de múltiples parámetros asociados a los procesos de secado de productos agroindustriales, con el objetivo claro de evaluar procesos novedosos, mejorar la eficiencia energética de los convencionales, o reducir su huella de carbono. Así mismo, y desde una perspectiva de calidad del producto, se pueden establecer estrategias de secado que apunten a mantener la riqueza nutricional. Para el caso de los dos cultivos priorizados en el marco del proyecto que financió su desarrollo, se incluyen los grados brix, la vitamina C y el color de la

guayaba; y el perfil sensorial, las grasas totales y el contenido de polifenoles de los granos de cacao deshidratados.

La unidad de secado ha sido instrumentada con sensores y actuadores con el fin de controlar y automatizar la estrategia de secado asociada al producto de interés; así mismo, permite establecer los algoritmos de control y supervisión que permiten emprender tareas de análisis de datos y posprocesamiento de la información recopilada.

Una de las aplicaciones directas del equipo es la evaluación de la cinética de secado de diversos productos cuando se secan por medios convectivos, y la obtención de información sobre el efecto que tiene el secado en las características físicas y químicas de los productos estudiados. Así mismo, permite la obtención de información experimental para la validación de modelos matemáticos de secado (tipo caja gris o caja negra). Estas herramientas tienen múltiples aplicaciones para el diseño y optimización, tanto de secadores, como de procesos de deshidratación.

Como resultado de las observaciones derivadas de estos trabajos se espera que los futuros desarrollos tecnológicos en materia de secadores utilicen la información experimental y/o los modelos obtenidos; o que se propongan nuevas investigaciones en este ámbito para evaluar el impacto de diferentes estrategias de secado en los atributos físicos y químicos de productos agroindustriales de interés, ya sea por su contenido nutricional, o por su impacto económico y/o social en las comunidades productoras.

REFERENCIAS

- Aghilinategh, N., Rafiee, S., Gholikhani, A., Hosseinpur, S., Omid, M., Mohtasebi, S. S., & Maleki, N. (2015). A comparative study of dried apple using hot air, intermittent and continuous microwave: Evaluation of kinetic parameters and physicochemical quality attributes. *Food Science & Nutrition*, *3*(6), 519-526. https://doi.org/10.1002/fsn3.241
- Ahmed, N. A. (2013). *Wind Tunnel Designs and Their Diverse Engineering Applications*. https://doi.org/10.5772/3403
- Akter, F., Muhury, R., Sultana, A., & Deb, U. K. (2022). A Comprehensive Review of Mathematical Modeling for Drying Processes of Fruits and Vegetables. *International Journal of Food Science*, *2022*(1), 6195257. https://doi.org/10.1155/2022/6195257
- Caré, I., Bonthoux, F., & Fontaine, J.-R. (2014). Measurement of air flow in duct by velocity measurements. *EPJ Web of Conferences*, *77*, 00010. https://doi.org/10.1051/epjconf/20147700010
- Catalkaya, M., Akay ,O. Erdal, Das ,Mehmet, & and Akpinar, E. (2023). Application of experimental, numerical, and machine learning methods to improve drying performance and decrease energy consumption of tunnel-type food dryer. *Drying Technology*, *41*(12), 2042-2061. https://doi.org/10.1080/07373937.2023.2216781
- Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, M. (Colombia), Departamento Administrativo de Ciencia, T. e I., & Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, B. (Colombia). (2016). *PECTIA :Plan Estratégico de Ciencia, Tecnología e Innovación del sector Agropecuario colombiano (2017-2027)*. Corporación colombiana de investigación agropecuaria - AGROSAVIA. https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/12759

- Defraeye, T. (2014). Advanced computational modelling for drying processes–A review. *Applied Energy*, *131*, 323-344.
- Guo, Q., Zhang, M., Mujumdar, A. S., & Yu, D. (2024). Drying technologies of novel food resources for future foods: Progress, challenges and application prospects. *Food Bioscience*, *60*, 104490. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.104490
- Huang, D., Yang, P., Tang, X., Luo, L., & Sunden, B. (2021). Application of infrared radiation in the drying of food products. *Trends in Food Science & Technology*, *110*, 765-777. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.039
- International Commission of Agricultural Engineering (Ed.). (1999). *CIGR handbook of agricultural engineering*. American Society of Agricultural Engineers.
- Jaturonglumlert, S., & Kiatsiriroat, T. (2010). Heat and mass transfer in combined convective and far-infrared drying of fruit leather. *Journal of Food Engineering*, *100*(2), 254-260. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.04.007
- Kilic, M., Sahin, M., Hassan, A., & Ullah, A. (2024). Preservation of fruits through drying—A comprehensive review of experiments and modeling approaches. *Journal of Food Process Engineering*, *47*(3), e14568. https://doi.org/10.1111/jfpe.14568
- Lin, Y.-P., Tsen, J.-H., & King, V. A.-E. (2005). Effects of far-infrared radiation on the freeze-drying of sweet potato. *Journal of Food Engineering*, *68*(2), 249-255. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.05.037
- Lingayat, A., Zachariah, R., & Modi, A. (2022). Current status and prospect of integrating solar air heating systems for drying in various sectors and industries. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *52*, 102274. https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102274
- Malekjani, N., & Jafari, S. M. (2018). Simulation of food drying processes by Computational Fluid Dynamics (CFD); recent advances and approaches. *Trends in Food Science & Technology*, *78*, 206-223. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.06.006
- Nirmaan, A. M. C., Rohitha Prasantha, B. D., & Peiris, B. L. (2020). Comparison of microwave drying and oven-drying techniques for moisture determination of three paddy (Oryza sativa L.) varieties. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, *7*(1), 1. https://doi.org/10.1186/s40538-019-0164-1
- Onwude, D. I., Hashim, N., Abdan, K., Janius, R., Chen, G., & Kumar, C. (2018). Modelling of coupled heat and mass transfer for combined infrared and hot-air drying of sweet potato. *Journal of Food Engineering*, *228*, 12-24. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.02.006
- Onwude, D. I., Hashim, N., & Chen, G. (2016). Recent advances of novel thermal combined hot air drying of agricultural crops. *Trends in Food Science & Technology*, *57*, 132-145. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.09.012
- Srikiatden, J., & Roberts, J. S. (2007). Moisture Transfer in Solid Food Materials: A Review of Mechanisms, Models, and Measurements. *International Journal of Food Properties*, *10*(4), 739-777. https://doi.org/10.1080/10942910601161672
- Tzempelikos, D. A., Vouros, A. P., Bardakas, A. V., Filios, A. E., & Margaris, D. P. (2014). Case studies on the effect of the air drying conditions on the convective drying of quinces. *Case Studies in Thermal Engineering*, *3*, 79-85. https://doi.org/10.1016/j.csite.2014.05.001
- Wang, C., Pei, Y., Mu, Z., Fan, L., Kong, J., Tian, G., Miao, S., Meng, X., & Qiu, H. (2024). Simulation Analysis of 3-D Airflow and Temperature Uniformity of Paddy in a Laboratory Drying Oven. *Foods*, *13*(21), Article 21. https://doi.org/10.3390/foods13213466
- Welsh, Z., Simpson, M. J., Khan, M. I. H., & Karim, M. A. (2018). Multiscale Modeling for Food Drying: State of the Art. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *17*(5), 1293-1308. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12380

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2025 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)