



Unidad experimental acondicionadora de aire

como soporte a la investigación de procesos
de secado de productos agroindustriales del
ecosistema de CTI de Santander

AGROSAVIA
EDITORIAL

Unidad experimental acondicionadora de aire

como soporte a la investigación de procesos de secado de productos agroindustriales del ecosistema de CTI de Santander

Ariel René Carreño Olejua
Javier Mauricio Castellanos Olarte
Lucero Gertrudis Rodríguez Silva
Fabricio Eulalio Leite Carvalho
Leidy Yibeth Deantonio Florido

Unidad experimental acondicionadora de aire como soporte a la investigación de procesos de secado de productos agroindustriales del ecosistema de CTI de Santander. / Ariel René Carreño Olejua [y otros cuatro] – Mosquera, (Colombia): AGROSAVIA, 2025.

66 páginas (Colección Alianzas AGROSAVIA)

Incluye referencias bibliográficas, fotografías y gráficos.

ISBN: 978-958-740-787-7

ISBN e-Book: 978-958-740-788-4

1. Producción alimentaria 2. Tecnología postcosecha 3. Acondicionadores de aire 4. Secado 5. Innovación 6. Investigación 7. Agroindustria 8. Santander (Colombia). I. Carreño Olejua, Ariel René II. Castellanos Olarte, Javier Mauricio III. Rodríguez Silva, Lucero Gertrudis IV. Leite Carvalho, Fabrício Eulalio V. Deantonio Florido, Leidy Yibeth.

Palabras clave normalizadas según Tesauro Multilingüe de Agricultura Agrovoc
Catalogación en la publicación – Biblioteca Agropecuaria de Colombia

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA)

Sede Central, kilómetro 14 vía Mosquera-Bogotá, Mosquera, Cundinamarca. Código postal 250047, Colombia.

Centro de Investigación La Suiza, kilómetro 32 vía al Mar, vereda Galápagos, Rionegro, Santander. Código postal 687511, Colombia.

Esta publicación forma parte de los resultados del proyecto “Fortalecimiento de las capacidades en ciencia, tecnología e innovación del centro de investigación La Suiza para el desarrollo de proyectos en fitosanidad y agroindustria en sistemas de producción priorizados en el departamento de Santander”, con código BPIN 2020000100462, financiado por el Sistema General de Regalías y desarrollado por AGROSAVIA.

Colección: Alianzas AGROSAVIA

Tipología: Manual

Fecha de recepción: 4 de diciembre de 2023

Fecha de evaluación: 8 de febrero de 2024

Fecha de aceptación: 5 de junio de 2024

Primera edición: 400 ejemplares

Impreso en Bogotá, Colombia, enero de 2025

Autores

Ariel René Carreño Olejua

Javier Mauricio Castellanos Olarte

Lucero Gertrudis Rodríguez Silva

Fabrício Eulalio Leite Carvalho

Leidy Yibeth Deantonio Florido

Preparación editorial

Editorial AGROSAVIA

editorial@agrosavia.co

Líder editorial: Astrid Verónica Bermúdez Díaz

Edición: Verónica Barreto Riveros

Corrección de estilo: Amalia Tapiero Barreto

Diseño: Mónica Cabiativa Daza

Diagramación: Javier Barbosa

Ilustraciones: Juan Felipe Martínez Tirado

Impresión: DGP Editores

Citación sugerida: Carreño-Olejua, A. R., Castellanos-Olarte, J. M., Rodríguez-Silva, L. G., Leite-Carvalho, F. E., & Deantonio-Florido, L. Y. (2025). *Unidad experimental acondicionadora de aire como soporte a la investigación de procesos de secado de productos agroindustriales del ecosistema de CTI de Santander*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA).

<https://doi.org/10.21930/agrosavia.manual.7407884>

Cláusula de responsabilidad: AGROSAVIA no es responsable de las opiniones ni de la información recogidas en el presente texto. Los autores asumen de manera exclusiva y plena toda responsabilidad sobre su contenido, ya sea este propio o de terceros, y declaran, en este último supuesto, que cuentan con la debida autorización de terceros para su publicación; igualmente, declaran que no existe conflicto de interés alguno en relación con los resultados de la investigación propiedad de tales terceros. En consecuencia, los autores serán responsables civil, administrativa o penalmente, frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros relativa a los derechos de autor u otros derechos que se hubieran vulnerado como resultado de su contribución.

Línea de atención al cliente: 018000121515
atencionalcliente@agrosavia.co
www.agrosavia.co



https://co.creativecommons.org/?page_id=13

Contenido

6 Introducción

8 Capítulo I. Descripción de la tecnología

9 Antecedentes

10 Generalidades del diseño

13 Los requerimientos de la unidad experimental

15 Modelo conceptual sobre el que se desarrolla la unidad experimental

18 Capítulo II. La unidad experimental

19 Descripción de subsistemas, operación y mantenimiento

20 Control de la velocidad del aire

23 Unidad de humidificación del aire

28 Unidad de calentamiento del aire

30 Sección de secado

32 Secciones conductoras de aire

33 Parametrización y automatización

38 Rangos de operación

40 Capítulo III. El secado y el enfoque de calidad

- 41 El secado del cacao
 - 42 Fase de presecado
 - 42 Fase de secado total
 - 43 Efectos del secado en la calidad del grano de cacao
- 45 El secado de la guayaba
- 49 Implementación de protocolos experimentales
 - 49 Curvas de secado de materiales agroindustriales
 - 53 Control de variables de proceso para la elaboración de curvas de secado en el dispositivo desarrollado

56 Capítulo IV. Prospectiva

- 58 Referencias
- 62 Anexo
- 63 Autoría



Introducción

La producción agrícola en Colombia ocupa el quinto lugar entre las actividades económicas más representativas, lo cual representa un aporte de aproximadamente el 9 % al producto interno bruto (PIB) y un 21 % del total de todas las exportaciones del país. Por otro lado, genera el 19 % del empleo nacional y el 66 % del empleo en las áreas rurales (García-Cáceres et al., 2014). En materia regional, de acuerdo con el plan estratégico de Ciencia, Tecnología e Innovación (CTI) del sector agropecuario, la participación del PIB agropecuario en el PIB departamental es del 10,7 %, mientras que el PIB departamental tiene una participación del 6,21 % en el PIB nacional. A pesar de su evidente importancia socioeconómica, su impacto en el PIB nacional podría ser más significativo si se aumenta el nivel de desarrollo de los procesos productivos y se introducen tecnologías adecuadas al sector agrícola, particularmente en las etapas de cultivo, cosecha y poscosecha.

Como respuesta a la evidente necesidad de impulsar el sector agrícola del país, y bajo la consigna de que *la ciencia, la tecnología y la innovación deben ser el motor del desarrollo social, económico y ambiental del sector agropecuario colombiano*, se diseñó un marco orientador para mejorar la seguridad alimentaria y nutricional de los productos agropecuarios, incrementar la productividad y competitividad de los sistemas productivos agropecuarios, promover los sistemas productivos ambientalmente sostenibles y fortalecer el capital social y las capacidades del Sistema Nacional de Innovación Agropecuaria. En este marco, se planteó una agenda de ciencia y tecnología con múltiples focos temáticos, entre los que se encuentran: la agroindustria 4.0; la sanidad, fitosanidad e inocuidad y la seguridad alimentaria y nutricional (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [AGROSAVIA] et al., 2016). Estos elementos de la agenda están vinculados con el desarrollo de procesos de poscosecha para productos alimenticios que garanticen su inocuidad, prolonguen el tiempo de conservación antes de

su consumo o procesamiento industrial, y mantengan los atributos de calidad para el consumidor final (color, aroma, sabor, contenido de compuestos bioquímicos de interés, textura, etc.).

Con este enfoque y como parte de los productos del proyecto “Fortalecimiento de las capacidades en Ciencia, Tecnología e Innovación (CTI) del Centro de Investigación La Suiza para el desarrollo de proyectos en fitosanidad y agroindustria en sistemas de producción priorizados en el departamento de Santander¹”, se desarrolló una unidad experimental de acondicionamiento de aire como soporte para la investigación de procesos de secado de productos agroindustriales del ecosistema de CTI del departamento. Las características técnicas de este dispositivo están orientadas a la evaluación del secado de diversos productos agroindustriales de la región, especialmente aquellos destinados a la producción de alimentos.

De esta manera, los estudios que se realicen en el equipo permitirán establecer el impacto de las variables del proceso de secado (temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del aire, temperatura del producto) en las características físicas, químicas y sensoriales del producto agroindustrial. Asimismo, el control automático de estas variables hará posible emular las condiciones del aire de secado de diversas regiones del país donde se realizan actividades de secado con métodos tradicionales o secadores solares.

En cuanto a los productos agroindustriales de interés, el dispositivo inicialmente se utilizó en el proceso de deshidratación de granos de cacao y frutos de guayaba, dos cadenas productivas agrícolas prioritarias para Santander. En este sentido, este documento abarca todos los aspectos del proceso metodológico utilizados para diseñar, construir y caracterizar la unidad experimental, los cuales son el resultado de los aportes técnicos y científicos del equipo de investigadores del centro de investigación La Suiza y de la sede CIMPA de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA) que participaron en el desarrollo del proyecto.

¹ Financiado por el Sistema General de Regalías de Santander.

Capítulo I

Descripción de la tecnología



Antecedentes

Es innegable que los procesos de poscosecha de productos agroindustriales ejercen una notable influencia no solo en su vida útil, sino también en las características físicas, químicas y organolépticas asociadas a su calidad. El secado podría considerarse la estrategia primordial de la poscosecha en los procesos de conservación de estos productos, ya que reduce el contenido de humedad a niveles adecuados mediante la exposición sistemática del material de interés a ambientes que permiten una migración segura del agua desde el producto hacia el medio circundante.

El secado es una técnica de preservación ancestral; no obstante, a pesar de su larga trayectoria, aún persisten desafíos críticos que deben abordarse, por ejemplo, el alto consumo energético, la cantidad de tiempo necesaria para alcanzar el nivel de humedad deseado y, en muchas ocasiones, el deterioro de los atributos que afectan la calidad percibida por el consumidor final. Estos tres aspectos están tan relacionados con el proceso que son ampliamente discutidos en numerosos documentos científicos y tecnológicos.

Aunque pueda parecer que no se ha avanzado en investigación y desarrollo tecnológico a lo largo del tiempo, sí se han logrado grandes avances en términos de eficiencia energética y comprensión de los fenómenos físicos asociados al secado de materiales. Sin embargo, frente a la crisis climática global, los desafíos se han vuelto más urgentes. Según la literatura, los procesos de secado son responsables de entre un 20 % y un 30 % del consumo industrial de energía (Kaveh et al., 2021).

En este contexto, el desarrollo de equipos y procesos de poscosecha eficientes que no afecten negativamente la calidad de los productos agroindustriales es un campo en el que AGROSAVIA ha decidido comprometerse activamente. Ahora bien, cuando se trata del secado de alimentos, es crucial considerar algunos elementos particulares del sector agrícola del país. Por ejemplo, este sector está compuesto principalmente por pequeños productores que, por razones prácticas, emplean predominantemente el secado natural o solar, lo cual usualmente no garantiza la uniformidad en el secado y puede propiciar la contaminación cruzada con diversos agentes biológicos. Estos desafíos están relacionados con la disponibilidad (o falta) de plataformas o equipos de secado adecuados, la imprevisibilidad de los fenómenos atmosféricos y la escasez de capacitación o documentos técnicos para respaldar la toma de decisiones por parte de los productores.

Teniendo en cuenta las características mencionadas, se pueden considerar diversas rutas para afrontar no solo los problemas de las tecnologías de secado mencionados al inicio, sino también para desarrollar estrategias técnicas o tecnológicas adecuadas al sector productor campesino colombiano.

Inicialmente, al considerar el uso de secadores solares, es crucial caracterizar el proceso de secado de un producto específico bajo las condiciones climáticas que prevalecen en distintas áreas del país. Estas condiciones incluyen aspectos ambientales como la temperatura del aire, la humedad relativa y la intensidad de la radiación solar. Por consiguiente, la caracterización del proceso permite determinar los tiempos mínimos necesarios de secado para alcanzar las condiciones de humedad de equilibrio, evaluar el aspecto final del producto seco (por ejemplo, color y estructura interna), y medir las temperaturas máximas alcanzadas en el material agroindustrial durante el secado para analizar su impacto en la composición química y los atributos organolépticos finales del producto (Hui, 2008).

De manera similar, si el objetivo es desarrollar tecnología eficiente centrada en la calidad del producto, es crucial obtener información experimental relevante para la construcción de modelos matemáticos o curvas de operación. Estos modelos permiten controlar variables fundamentales del proceso, como la temperatura, la humedad y la velocidad del aire de secado, la temperatura superficial del material en deshidratación, los tiempos de exposición a las fuentes de calor y el tiempo del material dentro del secador (Mujumdar, 2014).

En este contexto, es innegable la importancia de desarrollar tecnología que facilite la recolección de información experimental relevante y confiable sobre el proceso de secado de un material específico. Además, dadas las consideraciones prácticas mencionadas anteriormente, esta tecnología debe contar con una serie de aspectos técnicos que se detallan a continuación.

Generalidades del diseño

De acuerdo con las teorías vigentes sobre el proceso de secado de materiales biológicos, existen múltiples condiciones que deben satisfacerse para reducir el contenido de humedad hasta un valor específico. En términos simples, el agua contenida en el material de manera no ligada (agua libre) se transfiere al medio circundante gracias a los

gradientes de presión de vapor de agua presentes tanto en el material como en el aire que lo rodea. Desde el punto de vista físico, la presión de vapor en el material está relacionada con la denominada actividad del agua (a_w), que se define a su vez como la razón entre 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).

También es importante señalar que la complejidad del secado está relacionada con la manera en la que el agua se asocia a la matriz sólida. Cuanto más compacto y molecularmente unido esté el material, más difícil será eliminar su humedad. Cuando el enlace es de tipo químico, la remoción de humedad se logra únicamente mediante calentamiento a temperaturas extremadamente altas, secado al vacío o reacciones químicas. No obstante, la presencia de agua químicamente ligada en el material no contribuye al crecimiento de microorganismos.

Ahora bien, si el enlace es de tipo fisicoquímico o físico-mecánico, el secado permite eliminar la humedad. Al primero se le asocia con la “humedad ligada”, mientras que al segundo con la “humedad libre”. La humedad libre es mucho más fácil de transferir y, en esencia, se trata de agua contenida en macrocapilares y microcapilares ($0.5 \text{ mm} - 1 \mu\text{m}$). El prensado, por ejemplo, sirve para retirar el agua de los macrocapilares. En cuanto a la humedad ligada, aquella retenida dentro de las células del material mediante fuerzas osmóticas se puede transferir gracias al secado; sin embargo, la que está sólidamente retenida sobre la superficie y los poros del material por fuerzas de adsorción es difícil de remover mediante métodos de secado convencionales (Srikiatden & Roberts, 2007).

En este punto, es importante formular la siguiente pregunta: ¿Cómo se induce el proceso de secado o deshidratación en un material agroindustrial? Primero, vale la pena aclarar una diferencia generalmente imperceptible, ya que secado y deshidratación se usan a menudo como sinónimos. El secado es una operación que se asocia al proceso de transferencia de humedad en un producto mediante mecanismos externos sobre los cuales no se ejerce ningún tipo de control (por ejemplo, granos sobre una superficie plana expuestos a la radiación solar directa). En cambio, la deshidratación es un proceso en el que la reducción del contenido de humedad de un producto se consigue de manera controlada (por ejemplo, granos en un secador rotativo). Podría decirse que la deshidratación es un secado artificial o mecánico.

Independientemente de la situación, el mecanismo de transporte de humedad involucrado en la mayoría de soluciones tecnológicas, sobre las que se busca impactar con el desarrollo de un equipo experimental es la evaporación superficial (secado convectivo). Esto significa, en términos simples, que bajo la acción de aire caliente o de algún mecanismo de calentamiento, el agua contenida en el material agroindustrial se evapora y se transfiere al aire. En el proceso, el contenido de humedad del material disminuye y el del aire aumenta siempre y cuando la presión parcial del vapor de agua en el material sea superior a la presión parcial del agua en el aire. En un caso particular en el que no haya aporte de energía en forma de calor, se puede lograr que un producto pierda humedad si se garantiza que su actividad del agua es mayor que la presión de vapor del aire circundante.

Por último, sin pretender abordar en profundidad los mecanismos de transferencia de calor y masa presentes durante el proceso, el secado de materiales agroindustriales constituye un reto técnico importante debido a las complejas interacciones de los fenómenos de transporte tanto en la superficie del material como en su interior. Particularmente, el flujo de agua dentro del producto dependerá de la estructura del sólido, el contenido de humedad, la temperatura y la presión en poros y capilares. Mientras tanto, en la interfase con el aire de secado, la temperatura, la velocidad y la humedad de este, junto con la geometría de la superficie del producto, se convierten en las variables que afectan el transporte de agua hacia el medio.

En este orden de ideas, el estudio del secado de materiales agroindustriales por medios convectivos se basa en datos experimentales obtenidos generalmente en túneles de viento (Ahmed, 2013). Estos túneles permiten recrear el proceso que ocurre en la mayoría de los secadores de uso común y facilitan la medición y el control preciso de las variables de proceso que rigen el transporte de humedad interfacial.

Para el diseño de secadores o la configuración de procesos de secado, la estimación de la velocidad con la que se transfiere humedad desde el producto hacia el aire circundante permite cuantificar, por ejemplo, la potencia de un equipo industrial o el tiempo necesario para que el producto alcance ciertas condiciones. Desde un punto de vista meramente calculista, es posible obtener esta información a partir de correlaciones termodinámicas y de transporte de masa y calor. Sin embargo, también se requiere la estimación de los llamados coeficientes promedio de transferencia de calor y masa por convección,

que generalmente se cuantifican mediante expresiones matemáticas semiempíricas validadas en túneles de viento.

Los requerimientos de la unidad experimental

Con los elementos teóricos anteriormente expuestos, el proceso de diseño conceptual del equipo experimental se enmarca en la necesidad de evaluar los procesos de secado y deshidratación de productos agroindustriales, especialmente alimentos. La evaluación es un concepto amplio, ya que las pruebas deben permitir la recopilación de información relevante asociada a parámetros físicos como temperatura, humedad y velocidad del aire, contenido de humedad y temperatura del producto, y temperaturas de medios externos de calentamiento, si los hay. Además, se debe obtener información sobre variables físicas y químicas de interés, como color, volumen, estructura interna del material, compuestos orgánicos, e, incluso la evaluación del perfil sensorial del producto final.

Por consiguiente, la tabla 1 presenta una relación de las cantidades físicas o la información de interés que la unidad experimental debe controlar o supervisar durante una prueba dada.

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

Cantidad de interés (unidades)	Producto	Aire	Componente Equipo
Temperatura (C)	●	●	●
Humedad relativa (-)		●	
Velocidad promedio (m/s)		●	
Peso (g)	●		
Color (RGB)	●		
Area (m²)	●		
Potencia eléctrica (kW)			●
Presión hidrostática (psi)			●

Fuente: Elaboración propia

Ahora bien, periódicamente se obtiene información a partir de muestras del producto. Estas muestras son extraídas para su caracterización y luego pueden regresar de forma parcial a la unidad experimental o

ser retiradas definitivamente del proceso. Los análisis asociados a las muestras extraídas se resumen en la tabla 2.

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 específica	●	
Perfil sensorial	●	

Fuente: Elaboración propia

Por último, considerando las variables controladas y los análisis posibles de las muestras procesadas, se determinan los requisitos de la unidad experimental, incluyendo los obligatorios y los deseables (tabla 3).

Tabla 3. Resumen de requerimientos para el diseño de la unidad experimental

Requerimiento	Obligatorio	Deseable
Control y supervisión de la temperatura del aire del proceso mediante un sistema de calentamiento.	●	
Control y supervisión de la humedad relativa del aire del proceso mediante un sistema de humidificación.	●	
Control y supervisión de la velocidad del aire dentro de la unidad mediante un sistema variador de frecuencia para un equipo de ventilación.	●	
Supervisión de la temperatura de la muestra dentro de la unidad experimental.	●	
Supervisión y registro del peso de la muestra dentro de la unidad experimental.	●	
Sistema de visualización de la evolución de las variables del proceso en tiempo real.		●

Requerimiento	Obligatorio	Deseable
Sistema para el control de la temperatura de la muestra dentro de la zona de secado.		●
Sistema de adquisición de imágenes de la muestra dentro de la zona de secado.		●
Sistema de control de calentamiento directo de las muestras dentro de la zona de secado.		●
Mecanismo para fijación de muestras dentro de la zona de deshidratación.	●	
Sistema de fácil acceso a la zona de deshidratación para ingreso y salida de muestras.	●	
Materiales resistentes a la corrosión y compatibles con alimentos en la zona de ubicación de muestras.	●	
Sistema de circulación y renovación de aire para la unidad experimental.		●
Aislamiento térmico externo de los componentes de la unidad experimental.		●
Registro del consumo de energía eléctrica de los componentes de la unidad experimental.		●
Sistema de recirculación del aire de secado y ajuste fino de variables del proceso para mantener condiciones experimentales invariantes en el tiempo.	●	
Acondicionamiento del aire del proceso con energías alternativas (energía solar, sistemas recuperadores de calor y biomasa).		●

Fuente: Elaboración propia

Modelo conceptual sobre el que se desarrolla la unidad experimental

Basándose en lo expuesto en la sección anterior y siguiendo los lineamientos generales extraídos tanto de la literatura científica como de la oferta comercial de equipos para pruebas de secado de alimentos, se desarrolló un modelo conceptual para guiar el proceso de dimensionamiento, selección y construcción de una unidad experimental destinada al estudio de procesos de secado de productos agroindustriales con un enfoque en la calidad. El diagrama expuesto en la figura 1 esquematiza los elementos esenciales y la instrumentación básica asociada al modelo conceptual. Se representa un túnel de viento en un circuito cerrado, un ventilador para controlar la velocidad del aire, un sistema de humidificación por aspersión de agua, un sistema de calentamiento del flujo de aire y la sección de secado con una unidad de supervisión

del peso de las muestras. En esta última se pueden disponer las muestras en bandejas en configuraciones empaquetadas.

En el esquema, HC representa el control electrónico de humedad, TC representa el control electrónico de temperatura para el aire empleado, VC señala el control electrónico para la velocidad de aire en la cámara de secado, mientras que TI hace referencia al indicador de temperatura en la cámara de secado. Por último, WI representa el indicador de peso de la muestra dispuesta en la cámara de secado. Esta nomenclatura se basa en la norma ANSI/ISA 5.1-2022 Standard for Instrumentation Symbols and Identification.

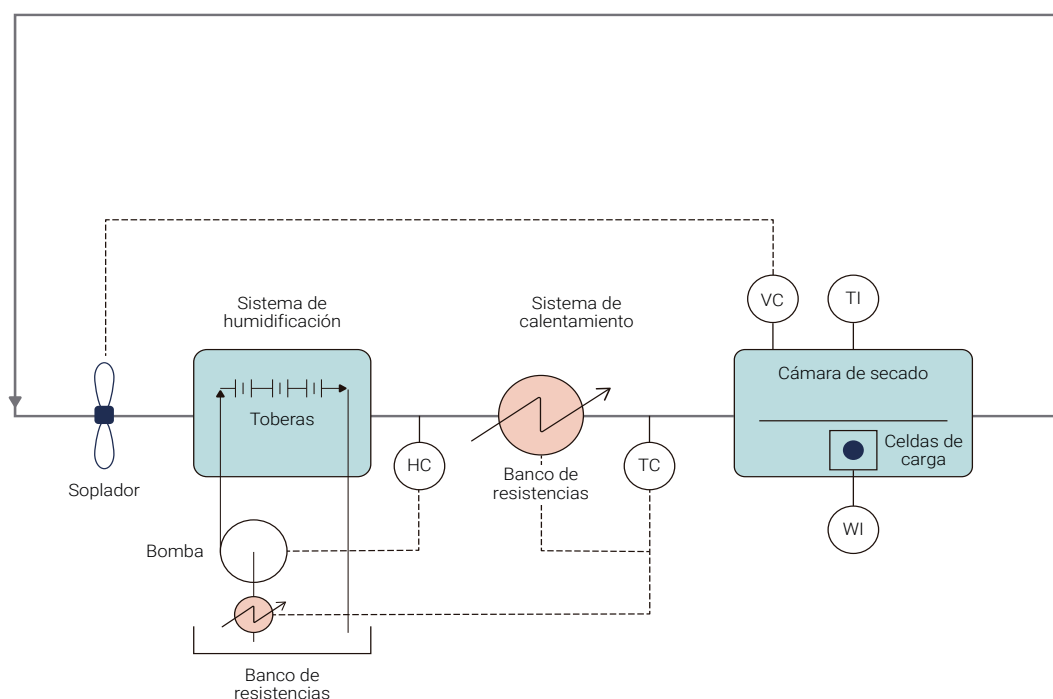


Figura 1. Modelo conceptual de la unidad experimental.

Fuente: Elaboración propia



Capítulo II

La unidad experimental



Descripción de subsistemas, operación y mantenimiento

La unidad experimental para pruebas de secado de productos agroindustriales permite controlar la temperatura, la velocidad y la humedad del aire al cual se exponen las muestras para reproducir procesos de secado con aire caliente. Igualmente, con el propósito de investigar el efecto combinado de la convección y la radiación, el módulo de secado puede incorporar placas radiantes de cerámica cuya temperatura también puede controlarse. En esencia, es un túnel de viento que permite mantener condiciones de secado constantes en un amplio rango de humedades, temperaturas y velocidades del aire.

La zona de pruebas y todas las secciones rectas de la unidad tienen dimensiones de 30 x 30 cm. La longitud total de las secciones horizontales del anillo es de aproximadamente 3,6 m y las secciones verticales miden aproximadamente 60 cm. Los ductos están fabricados con lámina de acero galvanizado calibre 20 (0,92 mm de espesor).

La figura 2 presenta un esquema simplificado donde se pueden identificar los diversos subsistemas y su disposición en la unidad experimental. La unidad de secado está fabricada con lámina de acero galvanizado e instrumentada con sensores de temperatura, humedad del aire y un sistema de celdas de carga para registrar la evolución del peso de las muestras agroindustriales.

La unidad de calentamiento de aire incluye resistencias eléctricas aletadas en forma de U, mientras que la unidad de humidificación se compone de un tanque de agua, un sistema de recirculación a presión y toberas que funcionan como aspersores. Asimismo, el aire dentro del equipo es movido por un soplador industrial de flujo axial.

Todas las variables de proceso son ajustadas electrónicamente mediante un Controlador Lógico Programable (PLC), una unidad de cómputo para procesos industriales (Workstation) y *software* especializado (Siemens NetS7-Link).

El diseño de esta unidad se basó en manuales de ventilación industrial y en estándares internacionales para el diseño de túneles de viento de baja velocidad (Hauer, 2016; Wang, 2000).

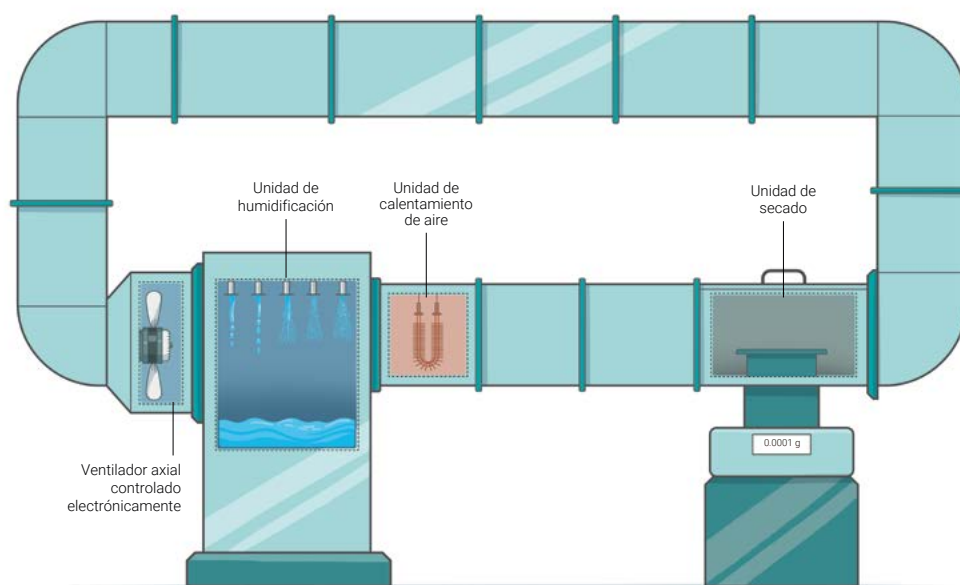


Figura 2. Esquema de la unidad experimental para secado de productos agroindustriales.

Fuente: Elaboración propia

En este sentido, el equipo permite fijar múltiples combinaciones de las variables del proceso para evaluar no solo la cinética del secado de productos agroindustriales sino también el impacto de parámetros como la humedad relativa del aire, la temperatura de bulbo seco, la velocidad del flujo de aire, la temperatura de las muestras y, si es el caso, la temperatura de superficies radiantes. Este impacto puede medirse en términos de los atributos sensoriales (aromas y sabores) y físicos (color, textura y microestructura), el contenido final de compuestos químicos de interés (ácidos grasos, carbohidratos y polifenoles) y el consumo específico de energía para alcanzar la humedad de equilibrio.

Control de la velocidad del aire

La velocidad del aire que pasa a través de la unidad de secado se controla mediante el flujo másico movido por el soplador axial gracias al variador de frecuencia acoplado a su motor eléctrico. De esta manera, la velocidad puede variar desde 0,03 m/s hasta aproximadamente 3,4

m/s. La rutina de control que permite alcanzar cualquier velocidad en este rango en la sección de pruebas se basa en el estándar ISO 3966 para la medición del flujo en conductos cerrados (Caré et al., 2014), validado a partir de mediciones de un anemómetro de hilo caliente que acompaña la instrumentación del equipo (figura 3) y una aplicación de cálculo.

De acuerdo con la norma, dado que los lados de la sección de pruebas son menores a 30 pulgadas, deben tomarse cinco puntos transversales. Además, los puntos de medición deben estar ubicados al menos dos diámetros hidráulicos aguas abajo de cualquier obstrucción y al menos un diámetro hidráulico antes de cualquier obstrucción. La figura 4 muestra esquemáticamente los puntos de medición.



Figura 3. Anemómetro de hilo caliente y sus componentes.

Fuente: Elaboración propia con base en el manual de operación del fabricante

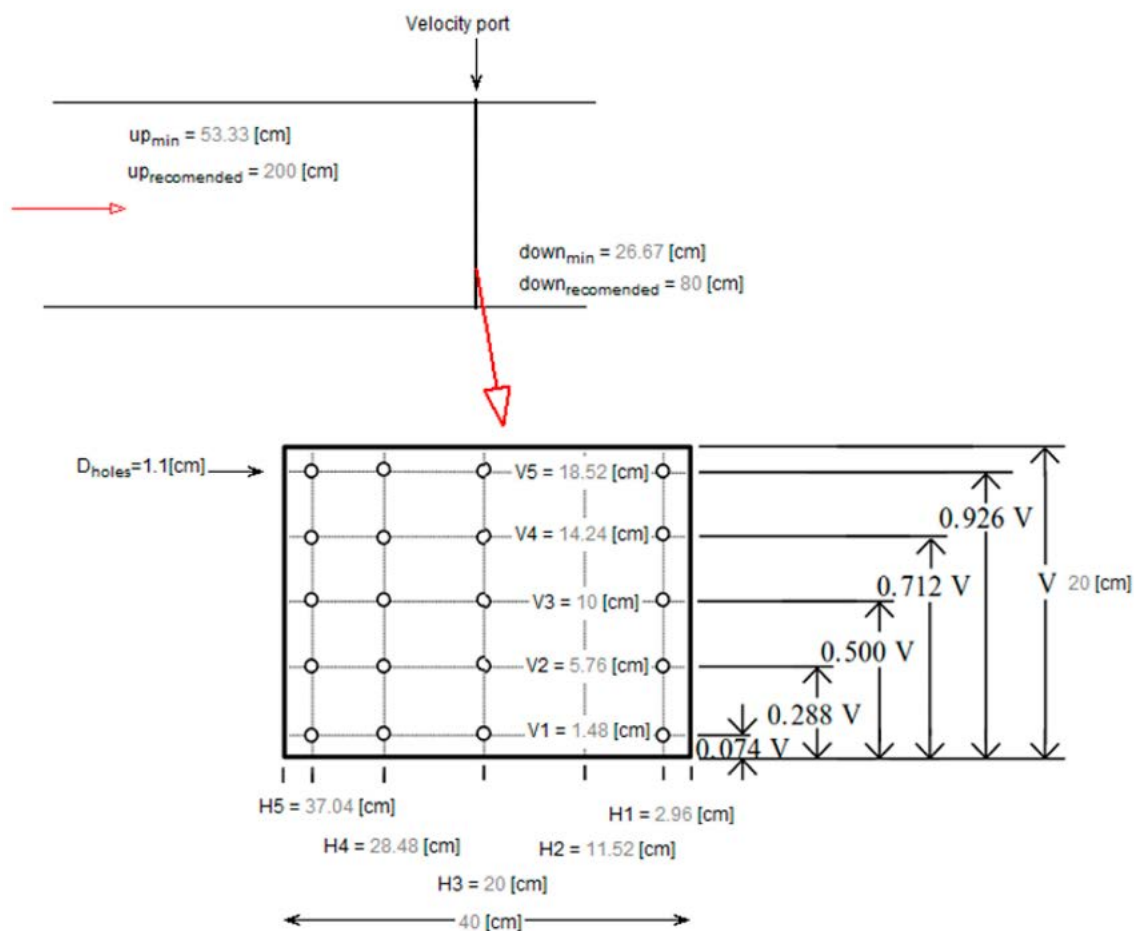
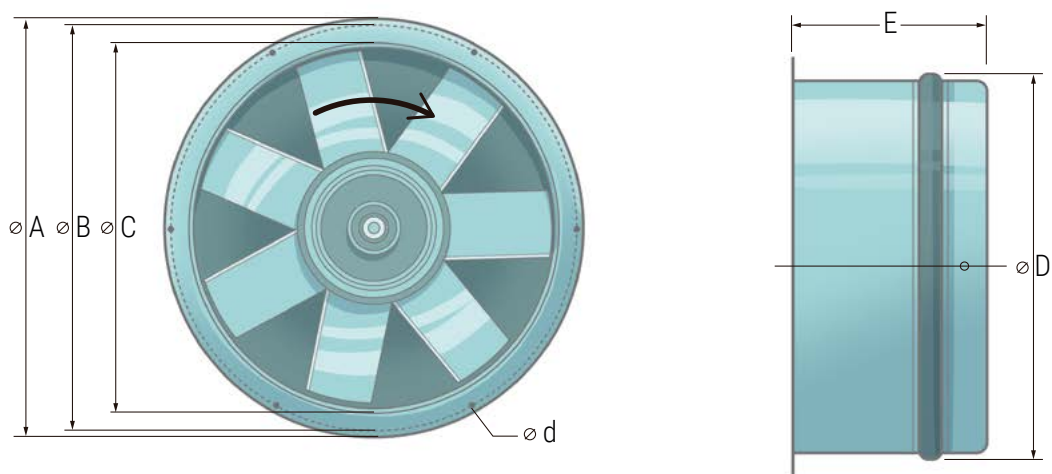


Figura 4. Puntos de medición de la velocidad en la sección transversal.

Fuente: Elaboración propia

Dado que la velocidad del aire se controla ajustando las revoluciones por minuto del soplador axial, el correcto funcionamiento de este equipo es crucial para la operación de la unidad experimental. La figura 5 muestra sus principales componentes y las dimensiones. Por otro lado, la tabla 4 enumera las tareas de mantenimiento preventivo recomendadas.



Tipo	$\varnothing A$	$\varnothing B$	$\varnothing C$	$\varnothing D$	E	$\varnothing d$
2CC2504-3F VENT AXIAL	554	528	504	518	260	11,5

Figura 5. Dimensiones generales del ventilador axial

Fuente: Elaboración propia con base en la página web del fabricante

Tabla 4. Tareas de mantenimiento del soplador axial

Tarea	Diario	Mensual	Semestral	Anual
Revisión y ajuste de tuercas y tornillos de elementos de soporte y conexión.		●		
Verificación del estado de las líneas de potencia eléctrica de motor y las conexiones.		●		
Verificación del control de velocidad de aire en la sección de pruebas a partir del estándar ISO 3966.			●	
Medición y evaluación de los niveles de vibración a diferentes velocidades de operación.			●	
Inspección y mantenimiento preventivo anual de ventilador y motor eléctrico según catálogo de fabricante.				●

Fuente: Elaboración propia con base en la guía de operación de fabricante.

Unidad de humidificación del aire

Como se mencionó anteriormente, el sistema de humidificación utiliza un arreglo de aspersores de agua tipo tobera (0,4 mm de diámetro) dentro de una unidad cerrada. Este sistema cuenta con un depósito de agua cuya temperatura puede controlarse mediante calentamiento eléctrico y un sistema hidráulico de alta presión con una bomba de diafragma para agua caliente.

Para alcanzar las condiciones de operación deseadas, se implementó una rutina automática basada en la medición de la temperatura del aire y su humedad relativa. El sistema de control de la unidad experimental ajusta la potencia de las resistencias eléctricas en la unidad de calentamiento de aire y en el tanque de la unidad de humidificación de acuerdo con un conjunto de parámetros definidos en una rutina de control automático *on-off*. Esta rutina se configura inicialmente utilizando las propiedades termodinámicas del aire húmedo al inicio de las pruebas experimentales, así como el método de las dos temperaturas para la humidificación del aire (Perry et al., 2002; Lin et al., 2005).

El proceso comienza con el calentamiento del agua en el depósito de la unidad hasta alcanzar la temperatura de rocío del aire experimental requerido. Cuando se alcanza esta condición, inicia el proceso de aspersión por el banco de toberas. Paulatinamente, la temperatura del aire comienza a aumentar hasta que su temperatura se iguala con la temperatura del agua de humidificación. En este punto, se detiene la humidificación y se enciende el banco de resistencias eléctricas del aire para adicionar calor sensible hasta que se fijan las condiciones del experimento. Todos los parámetros son establecidos con anticipación por medio de un algoritmo desarrollado con el *software* EES que involucra ecuaciones psicrométricas para el aire húmedo (figura 6). Este algoritmo requiere como información de entrada la presión absoluta del aire en el lugar de pruebas, la temperatura de bulbo seco y la humedad relativa del aire antes de poner en funcionamiento la unidad experimental. La temperatura de las pruebas y su humedad relativa pueden modificarse y observarse gráficamente para realizar pequeños ajustes con la unidad de control. Una vez seleccionada la humedad relativa, se representan tres procesos en el diagrama psicrométrico. En la figura 6, la línea vertical roja representa el proceso de humidificación y las líneas horizontales verdes las dos etapas de calentamiento sensible.

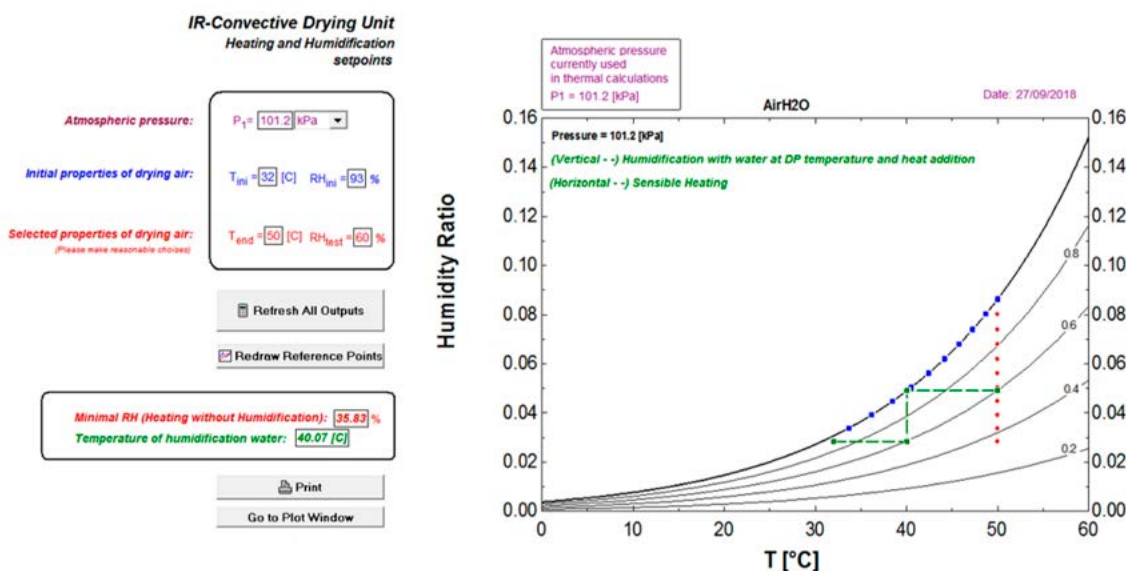


Figura 6. Estados termodinámicos del aire de pruebas durante el proceso de humidificación y calentamiento en la unidad experimental.

Fuente: Elaboración propia

Durante las pruebas experimentales, la unidad electrónica de control realiza un seguimiento continuo de la temperatura y la humedad del aire mediante un sensor termohigrómetro instalado cerca de la unidad de secado. De esta manera, se ajustan la humedad y la temperatura si es necesario. Un aspecto importante según el método utilizado es que la temperatura del agua de humidificación debe ser inferior a la temperatura de rocío de referencia. El ajuste debe ser igual a 0,1 °C por cada grado de diferencia entre la temperatura de bulbo seco del aire húmedo y su temperatura de rocío.

Operación y mantenimiento

La unidad de humidificación fue construida como un recinto cerrado prismático de acero inoxidable AISI 304 de espesor 3 mm (calibre 11). En el fondo, tiene un depósito de agua y en la parte superior, un sistema deflector del flujo de aire con láminas de acero inoxidable inclinadas de 50 cm de largo y 40 cm de ancho, calibre 11. El tanque cuenta con refuerzos externos en ángulo de acero inoxidable de y de espesor. La unidad se completa con un sistema hidráulico para pulverización de agua caliente mediante una bomba eléctrica. La figura 7 presenta

un modelo tridimensional del equipo donde se puede apreciar la tubería de aspersión (a) dispuesta en la parte superior del tanque y su conexión con la bomba en la parte inferior (b). Asimismo, la figura 8 muestra una imagen de la sección interna del tanque humidificador con la bomba eléctrica (c), las líneas para agua caliente de plástico de 6 mm (d), y las láminas deflectoras de acero inoxidable calibre 11 (e).

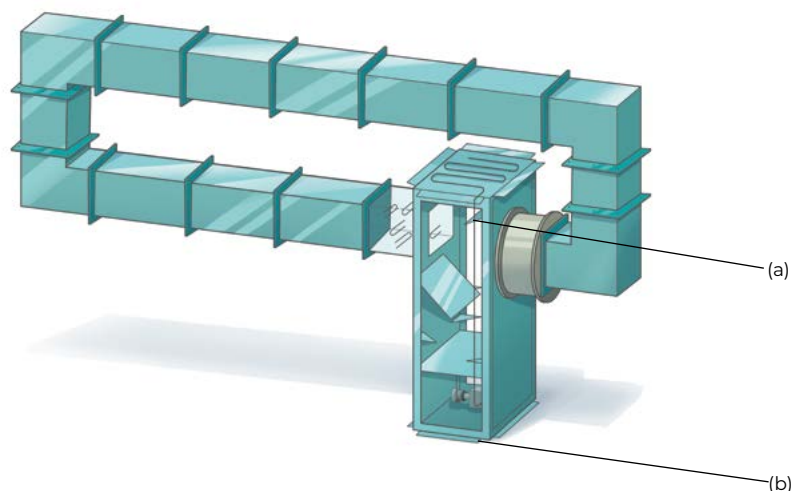


Figura 7. Isometría de la unidad experimental con detalle del tanque humidificador.

Fuente: Elaboración propia

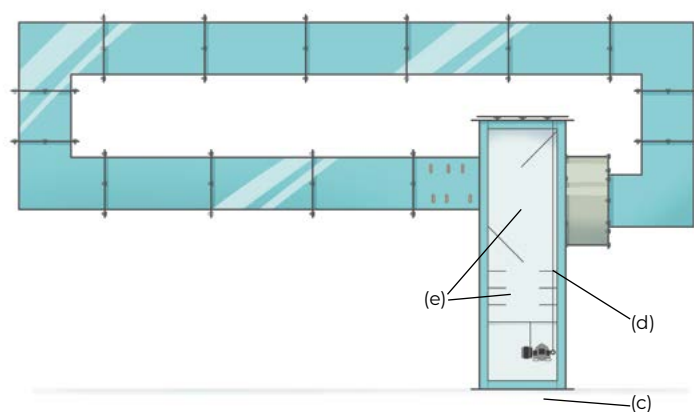


Figura 8. Detalle de la sección interna del tanque humidificador de aire.

Fuente: Elaboración propia

Si el nivel del agua dentro del tanque es adecuado, se fija la temperatura de trabajo para la prueba en el aplicativo de supervisión y control. Las condiciones iniciales de humedad y temperatura del aire dentro de la unidad experimental se registran, y el control electrónico lleva el agua dentro del tanque a la temperatura establecida por el algoritmo de humidificación. Una vez se cumple esta condición, se enciende el soplador axial y el sistema hidráulico presuriza la línea de agua caliente para iniciar la aspersión por las toberas. El sistema detiene la humidificación cuando el aire alcanza la temperatura y humedad requeridas. Las acciones básicas de mantenimiento preventivo se registran en la tabla 5.

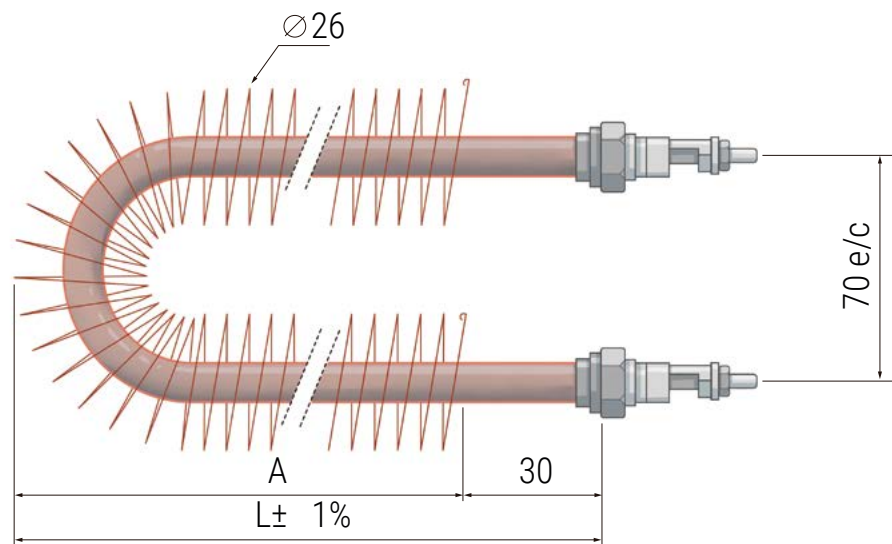
Tabla 5. Tareas de mantenimiento de la unidad de humidificación de aire

Tarea	Diario	Mensual	Semestral	Anual
Verificación del nivel de agua en el tanque.	●			
Verificación del accionamiento del relé de estado sólido (SSR), las resistencias eléctricas y la bomba de agua caliente.	●			
Verificación de lectura de los sensores de humedad y temperatura.	●			
Verificación del estado de las líneas de agua presurizada.		●		
Verificación de lectura del sensor de temperatura del agua mediante comparación directa, calibración del instrumento y limpieza general del sensor.			●	
Verificación del estado de las líneas de potencia eléctrica de la bomba y las líneas de comunicaciones de los sensores y actuadores.			●	
Ajuste de las tuercas y tornillos de los elementos de soporte y conexión.			●	
Verificación del estado y la limpieza de las toberas.				●
Verificación del estado general y la limpieza de las resistencias eléctricas.				●
Verificación del estado general de las conexiones eléctricas e hidráulicas.				●
Inspección y mantenimiento preventivo anual de la bomba según el catálogo del fabricante.				●

Fuente: Elaboración propia con base en la guía de operación de fabricante.

Unidad de calentamiento del aire

El calentamiento del aire se realiza con un arreglo de resistencias cilíndricas aletadas en forma de U, de 1.000 W cada una, que pueden combinarse para entregar hasta 6.000 W (figura 9). La unidad electrónica de control gestiona un arreglo de relé de estado sólido (SSR) a partir de una estrategia *on-off* para mantener la temperatura de bulbo seco constante durante los ensayos experimentales.



Calefactores aletados helicoidales en forma de “U”, modelos AHU

Código	Dimensiones en mm		Wattios	W/cm ³	Clase térmica constructiva Electricfor	Peso en kg
	Longitud (L)	Zona activa (A)				
AHU1000	23	200	1.000	8,1	T-700-T	0,28
AHU2000	445	415	2.000	7,7	T-700-T	053
AHU3000	655	625	3.000	T-700-T	7,7	0,78
AHU4000	870	840	4.000	7,6	T-700-T	1,03

Figura 9. Detalle de las resistencias eléctricas aletadas usadas en la unidad de calentamiento.

Fuente: Elaboración propia con base en la página web del fabricante

Operación y mantenimiento de la unidad de calentamiento

La unidad está integrada por un ducto de sección 30 x 30 cm fabricado mediante doblado y grafado con una lámina de acero galvanizado calibre 24, con unión TDF sin alisar.

Por su parte, las resistencias eléctricas se disponen transversalmente como un banco de tubos en un intercambiador de calor de flujo cruzado. Asimismo, se unen mediante bridas y pernos a la unidad de humidificación y a la sección posterior del túnel de viento. La figura 10 muestra la disposición de la sección de calentamiento (a) junto a las secciones colindantes (b) y la configuración de las resistencias en su interior (c).

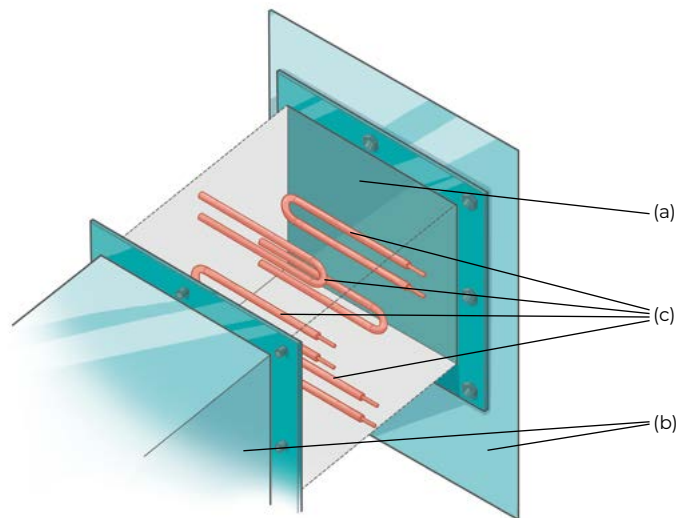


Figura 10. Detalle del arreglo de resistencias en la sección de calentamiento.

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, la relación de las tareas de mantenimiento preventivo de la unidad se especifica en la tabla 6.

Tabla 6. Tareas de mantenimiento de la unidad de calentamiento de aire

Tarea	Diario	Mensual	Semestral	Anual
Verificación del accionamiento del relé de estado sólido y de las resistencias eléctricas.	●			
Verificación de lectura de los sensores de temperatura del aire.	●			
Verificación del estado general y la limpieza de la superficie de las resistencias eléctricas aletadas.		●		
Verificación del estado de las líneas de potencia eléctrica de resistencias eléctricas y líneas de comunicación de sensores.			●	
Verificación de lectura del sensor de temperatura del agua comparando directamente el instrumento calibrado y la limpieza general del sensor.			●	
Inspección y mantenimiento preventivo anual de resistencias eléctricas según la guía del fabricante.				●

Fuente: Elaboración propia con base en la guía de operación del fabricante

Sección de secado

La sección de secado está diseñada para obtener la información experimental relevante del producto en estudio, razón por la cual en esta zona hay múltiples instrumentos de medición. La temperatura del producto se mide con termocuplas tipo K y un sensor infrarrojo; la variación del peso con el tiempo se registra de manera continua con un arreglo de celdas de carga tipo viga y una estructura interna que soporta las muestras. La tabla 7 detalla la instrumentación instalada en la sección de pruebas y sus especificaciones técnicas.

Tabla 7. Especificaciones de sensoria de la sección de secado

Sensor	Referencia	Fabricante	Rango	Precisión	Resolución
Celdas de carga	AS220X2	Radwag, USA	220 g	± 0,2 g	0,1 mg
Termohigrómetro	EE210P-HT-CB	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	-

Sensor	Referencia	Fabricante	Rango	Precisión	Resolución
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%	-

Fuente: Elaboración propia

Operación y mantenimiento de la sección de secado

Esta sección fue fabricada con lámina de acero inoxidable AISI 304, calibre 11 doblada y soldada. Tiene una sección transversal de 30 x 30 cm y una longitud de 62 cm. En su interior se encuentra un soporte para las muestras que se van a deshidratar conectado a las celdas de carga que registran las variaciones de peso con el tiempo. Además, cuenta con una compuerta lateral para introducir y retirar los instrumentos y muestras según los protocolos de las pruebas. El material es compatible con productos agroalimentarios y facilita labores de limpieza de acuerdo con las normas que reglamentan la maquinaria para procesar alimentos.

La figura 11 muestra los detalles constructivos y la conexión de la unidad (a) con los demás elementos del secador (b). Por otro lado, las tareas de mantenimiento necesarias para garantizar la integridad de la unidad se detallan en la tabla 8.

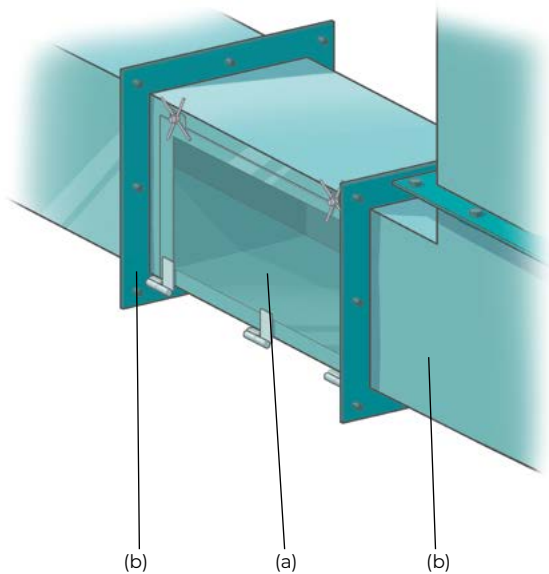


Figura 11. Detalles de la sección de pruebas con visualización de su interior.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8. Tareas de mantenimiento de la unidad de calentamiento de aire

Tarea	Diario	Mensual	Semestral	Anual
Limpieza y desinfección de la zona de secado.	●			
Verificación de lectura de los sensores de temperatura del aire.	●			
Verificación de lectura de los sensores de temperatura de muestras.	●			
Verificación del estado de hermeticidad de las puertas y secciones de paso de instrumentación y líneas de comunicación.		●		
Verificación de lectura de sensores de temperatura comparando directamente el instrumento calibrado y la limpieza general de los sensores.			●	
Ajuste de tuercas y tornillos de los elementos de conexión a las secciones de la unidad experimental.				●

Fuente: Elaboración propia con base en la guía de operación del fabricante

Secciones conductoras de aire

Las diferentes unidades descritas anteriormente forman un túnel continuo de aire mediante la conexión de varias secciones conductoras fabricadas con lámina galvanizada calibre 24 utilizando unión TDF sin alisar. Todas las secciones tienen una sección transversal de 30 x 30 cm y se conectan con bridas, tornillos, tuercas y empaques de caucho. Se incluyen secciones horizontales, cuatro secciones a 90 grados de diferentes longitudes y dos secciones verticales (30 cm de lado del ventilador y 25 cm del lado opuesto). La figura 12 muestra los detalles geométricos de estos elementos y cómo están dispuestos en el equipo. En cuanto a las actividades de mantenimiento preventivo, la tabla 9 enumera las acciones que deben realizarse periódicamente.

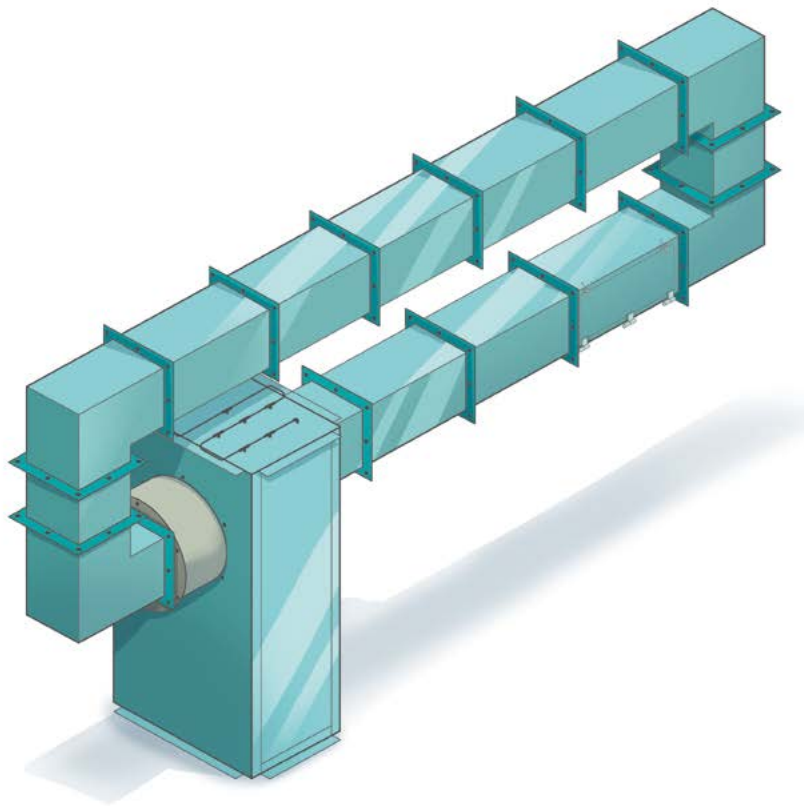


Figura 12. Detalles de las secciones que conforman el túnel de aire.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9. Tareas de mantenimiento de las secciones conductoras de aire

Tarea	Diario	Mensual	Semestral	Anual
Verificación de la integridad de las secciones conductoras.		●		
Verificación del estado de hermeticidad de juntas y bridas.		●		
Ajuste de tuercas y tornillos de elementos de conexión a las secciones colindantes.			●	
Limpieza general de las superficies exteriores				●

Fuente: Elaboración propia

Parametrización y automatización

De acuerdo con la estructura de subsistemas para la automatización presentada en la figura 13, los elementos finales y la instrumentación también están distribuidos de esta manera. Así, en la unidad de secado de productos agroindustriales se instalan elementos que permiten el acondicionamiento previo del aire en parámetros de humedad y temperatura. Entre estos elementos se encuentran dos resistencias eléctricas de 1.000 W instaladas en el depósito de agua, las cuales tienen como propósito calentar el agua a niveles determinados según la caracterización y la aproximación psicrométrica, controladas por un lazo de control que utiliza una termocupla como sensor de temperatura del agua conectada a un módulo de entradas analógicas en el PLC. El propósito de este subsistema es alcanzar una saturación del aire del 100 % dentro del rango de temperatura establecido. El ajuste de las condiciones de calidad del aire en los parámetros de temperatura se realiza en el subsistema de ajuste.

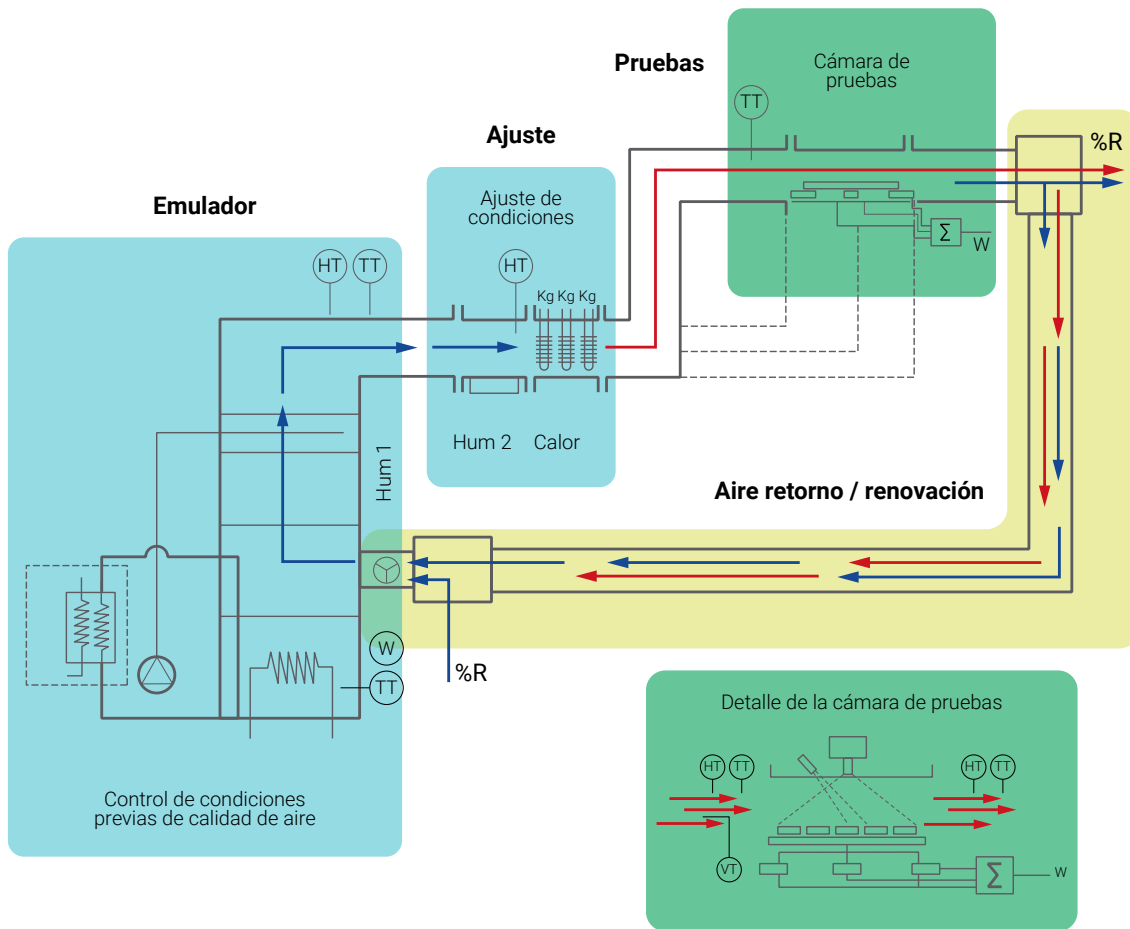


Figura 13. Descripción gráfica de la estructura de automatización por módulos de la unidad de acondicionamiento de aire con fines de secado.

Fuente: Elaboración propia

La temperatura de aire saturado al 100 % se registra en el ducto mediante un termohigrómetro. En una sección adicional del ducto de aire, mediante el uso de 6 resistencias aletadas de 1.000 W cada una, programadas escalonadamente, se incrementa la temperatura del aire hasta alcanzar el punto de operación del proceso. El aire de retorno/recirculación en el circuito es impulsado por un ventilador axial con motor trifásico. Este ventilador está controlado en lazo cerrado mediante un variador de frecuencia que se conecta al PLC mediante PRO-FIBUS. La velocidad del ventilador se ajusta de acuerdo con el rango de flujo deseado para el experimento utilizando la ecuación de la curva característica del ventilador como referencia.

La tabla 10 detalla las diferentes variables y la relación de elementos finales para el desarrollo de las rutinas de control.

Tabla 10. Tabla de instrumentos por variables y subsistemas

Ítem	Sensor/Actuador	ID en programa	Dirección CPU	Dirección en DB
Unidad de secado (1)				
1.	Termocupla	Temp.Agua	EW60	DB1.DB60
2.	Resistencia eléctrica	R1.Agua	A0.3	
3.	Resistencia eléctrica	R2.Agua	A0.4	
4.	Bomba hidráulica. aspersión	P1.Agua	A0.5	
Módulo de ajuste (2)				
5.	Temperatura	Temp.Aire.12	EW62	DB1.DBW62
6.	Humedad	Hum.Aire.12	EW64	DB1.DBW64
7.	Resistencia eléctrica	R1.Aire	A1.0	
8.	Resistencia eléctrica	R2.Aire	A1.1	
9.	Resistencia eléctrica	R3.Aire	A1.2	
10.	Resistencia eléctrica	R4.Aire	A1.3	
11.	Resistencia eléctrica	R5.Aire	A1.4	
12.	Resistencia eléctrica	R6.Aire	A1.5	
Unidad experimental (3)				
13.	Temperatura	Temp.Aire.23	EW100	DB1.DBW100
14.	Humedad	Hum.Aire.23	EW102	DB1.DBW102
15.	Peso de la muestra	Peso.Producto	ED104	DB1.DBD104
16.	Temperatura de la superficie del producto	Temp.Sup.Producto	EW106	DB1.DBW106
17.	Temperatura	Temp.Aire.34	EW108	DB1.DBW108
18.	Humedad	Hum.Aire.34	EW110	DB1.DBW110
19.	Pulso de muestreo	Pulso.CCDSensor	A1.5	DB1.DBX0.0
Circuito de recirculación de aire (4)				
20.	Punto de operación del ventilador	Vel.Vent.SP		DB10.DW0
21.	Velocidad del ventilador	Vel.Vent.Real		DB10.DW2
22.	Velocidad del aire	Vel.Aire	EW112	DB1.DW112
Señales generales				
23.	Encendido general	T.Start	E0.0	DB2.DBX0.0
24.	Encender humidificador	H.Start	E0.1	DB2.DBX0.1
25.	Encender ajuste de temperatura	A.Start	E0.2	DB2.DBX0.2

Ítem	Sensor/Actuador	ID en programa	Dirección CPU	Dirección en DB
26.	Encender ajuste	A.Start	E0.2	DB2.DBX0.2
27.	Encender experimento	Ex.Start	E0.3	DB2.DBX0.3
28.	Habilitar toma de datos	Data.Start	E0.4	DB2.DBX0.4
29.	Apagado de emergencia	NA.Stop	E0.5	DB2.DBX0.5

Notas:

1. En la tabla, a manera de ilustración, se presenta la forma y estructura de las variables en el PLC, donde se observan las variables que están asociadas a un instrumento físico y que corresponde con el algoritmo de programación. Otras variables, como las de interacción entre el PLC y el HMI, no se ilustran en la tabla, pero están disponibles para su observación en la estructura de programa.;

2. Para el **software** de programación Simatic TIA V17, la letra E (*Eingang*) significa entrada y la letra A (*Ausgang*) significa salida.

Fuente: Elaboración propia

La figura 14 muestra detalles de la parametrización realizada con el **software** de automatización y el control encargado de administrar las variables del proceso.

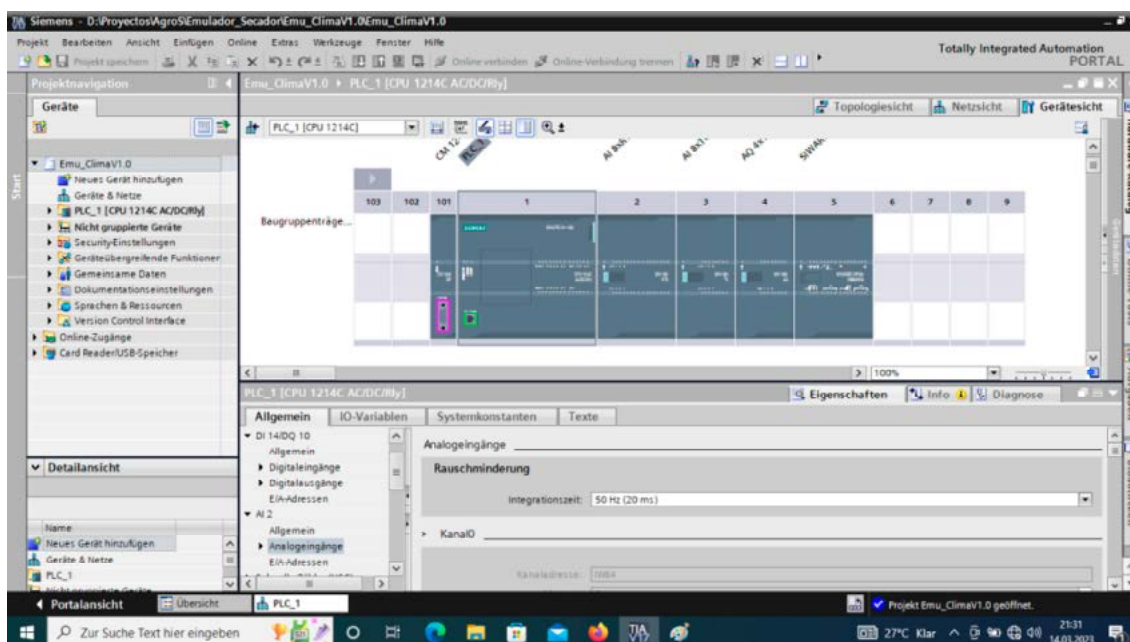


Figura 14. Ambiente de diseño de los aplicativos de supervisión y control de la unidad experimental.

Fuente: Elaboración propia

En concordancia con la norma DIN 61131, y en lo relacionado con la estructura de programa utilizando el *software* Siemens TIA V17, se ha estructurado el programa y los subprogramas de supervisión y control. Estos programas configuran programas de organización (OB: Organisationsbaustein), así como bloques de función (FB: Funktionsbaustein) y bloques de datos (DB: Datenbaustein) ordenados de acuerdo con su objetivo en una estructura de control y supervisión (figura 15).

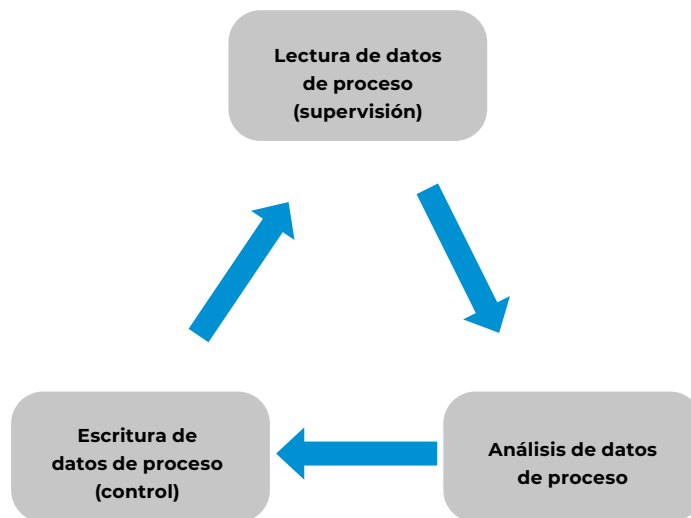


Figura 15. Ciclo general de interacción de datos en la CPU en el SCADA.

Fuente: Elaboración propia

La lectura de datos de proceso tiene como objetivo capturar cada uno de los valores digitales conectados a los diferentes módulos de adquisición de señales digitales y análogas, como sensores de temperatura, sensores de humedad, sensores de velocidad, entre otros. Esta lectura incluye las funciones de normalización y escalamiento en los rangos específicos para cada sensor, así como su respectivo almacenamiento en bases de datos estáticas para su posterior análisis.

```

0026 #Val_Canal_5 := NORM_X(MIN := 0, VALUE := #Canal_5, MAX := 27648);

0027 #HumeTH_1 := SCALE_X(MIN := #Rango_HTH_min, VALUE := #Val_Canal_5,
MAX := #Rango_HTH_Max);
  
```

El conjunto de análisis de datos del proceso tiene como objetivo evaluar cada una de las variables de respuesta en un sistema de control para generar valores de ajuste del proceso y así corregir o mantener las condiciones establecida. Por ejemplo, el lazo de control de temperatura del

agua de humidificación del aire, para lo cual la frecuencia de accionamiento de la resistencia eléctrica se ajusta para mantener, aumentar o disminuir la temperatura hasta alcanzar el valor deseado previamente fijado mediante el HMI.

En la escritura de datos para control (derivados de los datos calculados en algoritmos de proceso de análisis y almacenados en variables temporales), se llevan a cabo operaciones de escalamiento y transformación a valores digitales para su respectivo almacenamiento en bloques destinados a la escritura, relacionados con la periferia de escritura en los diferentes módulos de salidas digitales o análogas.

Rangos de operación

Para caracterizar los rangos de operación del equipo, su capacidad de control de proceso y el registro de las variables asociadas a la cinética del secado de productos, se utilizarán granos de cacao fermentados como material de referencia. La tabla 11 muestra los valores de los factores que se tendrán en cuenta en el diseño experimental, los cuales están relacionados con los rangos representativos de los procesos de secado natural y artificial reportados en la literatura científica (Abhay et al., 2016; Alean et al., 2016; García-Alamilla et al., 2007; Hii et al., 2006; Ndukwu, 2009).

Tabla 11. Valores seleccionados para los factores del diseño experimental

Velocidad del aire [m/s]	Humedad relativa [%]	Temperatura del bulbo seco [°C]
2	50	36
1	60	48
0,5	70	60

Fuente: Elaboración propia

Capítulo III

El secado y el enfoque de calidad



El secado del cacao

Los granos de cacao son sometidos a proceso de fermentación para la formación de precursores de sabor y aroma mediante levaduras y bacterias. Al final de esta etapa, la humedad disminuye de un 65 % (temperatura de bulbo húmedo [WB]) a un 55 % (WB) (Orna Chávez et al., 2018). Después de esta fase, inicia el proceso de secado, que permite reducir el contenido de humedad a valores entre 6 % (WB) y 8 % (WB) y promover la formación del de sabor y aroma del chocolate. Con este proceso se disminuye el riesgo de contaminación por hongos y se aumenta la vida útil del grano (López Cerino & Chávez García, 2018). La reducción del contenido de humedad se produce por evaporación, en la cual intervienen la transferencia de masa y calor (Fito et al., 2016). Este proceso de secado puede ser natural o forzado; para los granos de cacao, tradicionalmente se realiza con exposición solar sobre plataformas de madera, uso de marquesinas, paseras corredizas, esteras de guadua y casas elbas. También se utilizan recursos disponibles como superficies de cemento y plásticos, aunque esta práctica no es recomendable ya que puede afectar la calidad final del grano de cacao (Jaimes Suárez et al., 2021). El uso de equipos de secado permite reducir el tiempo de secado, disminuir la mano de obra y asegurar la inocuidad del producto final. Sin embargo, si se utilizan equipos con combustibles, es importante evitar que los granos de cacao entren en contacto directo para prevenir contaminación (Maroto et al., 2017).

Es necesario realizar el proceso teniendo en cuenta la calidad y el cumplimiento de las normativas vigentes en cada país. En Colombia, el porcentaje de humedad que se debe alcanzar para comercializar el grano de cacao debe oscilar entre 7 % y 7,5 % (WB). El cumplimiento de este requisito está reglamentado por la Norma Técnica Colombiana (NTC) 1252 de 2021 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [Icontec], 2021). El incumplimiento de este requisito puede resultar en una reducción del precio del producto durante la transacción debido al incumplimiento de los rangos de humedad requeridos. Esto podría generar riesgos relacionados con la inocuidad, pues se podría propiciar la formación de hongos que afecten la calidad y la homogeneidad del producto seco.

Para el desarrollo del proceso de cacao con herramientas actuales o tradicionales, es necesario considerar las siguientes fases y recomendaciones técnicas.

Fase de presecado

El inicio del proceso de secado del cacao debe llevarse a cabo de manera pausada y controlada durante las primeras 48 horas. En este período, continúa la fermentación y comienza una fase de estabilización de las condiciones de temperatura, disminución de microorganismos fermentativos, pérdida de compuestos volátiles, oxidación y disminución de la humedad interna. El secado lento permite que el ácido acético y el ácido láctico, presentes en los líquidos residuales dentro del grano como resultado de la fermentación, se difundan hacia la superficie y se evaporen. Esto evita que la presencia excesiva de estos compuestos afecte la calidad sensorial del cacao. Además, esta fase garantiza una mayor oxidación y conservación del hinchamiento del grano logrado durante la fermentación, lo cual promueve una mayor movilidad de la humedad hacia la cascarilla.

Cuando se realizan secados acelerados con alta intensidad de radiación solar, existe el riesgo de formar una capa dura en la superficie del grano que impide la migración de la acidez y la humedad (encostamiento). Por lo tanto, es crucial llevar a cabo un proceso de pre-secado que facilite la evaporación de los compuestos ácidos exponiendo el grano de 2 a 3 horas al sol con radiación media, preferiblemente en horas de la tarde. El lecho de granos en la plataforma debe tener un espesor entre 5 cm y 8 cm, y se deben mover cada media hora para asegurar un secado uniforme, la separación de los granos y la movilidad del viento. Estas prácticas promueven un secado controlado que contribuye a una óptima calidad física, química y sensorial del grano (Aguilar, 2016; Jaimes Suárez et al., 2021; Perez & Contreras, 2017).

Fase de secado total

Después de la fase de pre-secado, comienza el proceso de secado completo, durante el cual se completan los procesos bioquímicos de formación de precursores de sabor y aroma y se reduce la humedad del grano hasta niveles de 7 a 7,5 % (wb). Surtido esto, se procede al almacenamiento de los granos de cacao (Parra Rosero, 2018). En esta etapa, se produce una mayor reducción de la humedad interna debido a la exposición prolongada de los granos al viento y la radiación solar. El tiempo total de secado está influenciado por las condiciones climáticas

y los métodos utilizados, razón por la cual puede variar entre 5 y 10 días. Durante este proceso, el peso de los granos de cacao disminuye. Por este motivo, se han reportado porcentajes de reducción del grano húmedo con respecto al grano seco que oscilan entre 63 % y 55 %. Esto significa que, aproximadamente, de cada 100 kg de cacao húmedo se obtienen entre 37 kg y 45 kg de cacao seco (Red Cacaotera, 2023).

El método óptimo de secado es el aprovechamiento de la energía solar; no obstante, también se pueden emplear métodos mecánicos. Estas alternativas contribuyen a estandarizar, agilizar y mejorar los procesos para garantizar la calidad y eficiencia.

Efectos del secado en la calidad del grano de cacao

En Colombia, la Norma Técnica Colombiana NTC 1252 de 2021 (Icontec, 2021) establece las especificaciones y requisitos de calidad del grano de cacao seco destinado a la comercialización. Para el parámetro de humedad, el cacao considerado premium o especial debe presentar un contenido de humedad del 7 % (wb), mientras que para el cacao estándar y corriente, la humedad permitida es del 7,5 % (wb). Además de este parámetro, se evalúa la fermentación interna en el grano, un factor que implica las fases iniciales de pre-secado y secado, ya que en ellas se completan los procesos bioquímicos. La calidad física y sensorial del cacao se ve afectada si estos procesos no se completan adecuadamente. La evaluación de la calidad física del grano se realiza mediante la prueba de corte y otros parámetros descritos en la tabla 12.

Tabla 12. La Norma Técnica Colombiana NTC 1252 de 2021 (Icontec, 2021) determina las especificaciones y requisitos de calidad para grano de cacao seco

Requisitos	Clasificación de cacao en grano		
	Premio/especial	Estándar	Corriente
Contenido de humedad (%)	7,0	7,5	7,5
Contenido de impurezas o materias extrañas (%)	0	0,3	0,5
Grano mohoso interno: #granos/100 granos (máximo)	1	3	5
Contenido de grano partido: #granos/100 granos (máximo)	1	2	5
Granos dañados por insectos o germinación: #granos/100 granos (% máximo)	1	2	3
Granos bien fermentados: #granos/100 granos (máximo)	70	65	55
Granos insuficientemente fermentados y violetas (% máximo)	30	35	45
Granos sin fermentar: #granos/100 granos (máximo)	1	3	5

Fuente: Elaboración propia con base en Icontec (2021)

La evaluación física del grano permite determinar si los procesos de fermentación y secado se llevaron a cabo correctamente y ayuda a prever la calidad y la transformación de la matriz alimentaria. Esta calidad también se confirma mediante el análisis sensorial, ya que puede suceder que el grano exhiba niveles adecuados de humedad y fermentación, pero durante el secado haya retenido acidez o esté contaminado.

El proceso de secado afecta las características físicas, químicas y sensoriales del grano de cacao, ya que promueve reacciones térmicas que causan cambios en los precursores de sabor y aroma, oscurecimiento enzimático, formación de pigmentos marrones y degradación de polifenoles (Ortiz de Bertorelli et al., 2009).

Desde el punto de vista de la inocuidad, un proceso de secado adecuado evita la presencia de ocratoxina A (OTA), una toxina producida por hongos del género *Aspergillus* y *Penicillium*. Según un estudio, el secado directo al sol reduce la presencia de estas toxinas, pues disminuye la actividad acuosa y la humedad, lo cual previene el crecimiento de microorganismos. Sin embargo, esta calidad se mantiene siempre

y cuando las condiciones climáticas sean estables. En caso de alta humedad, bajas temperaturas o lluvia, puede generarse contaminación por hongos (Ramos et al., 2016).

Los procesos de secado tienen un impacto significativo en la calidad general del grano de cacao, por lo que es crucial considerar el tipo de secador y las condiciones de operación. En la tabla 13 se muestra el efecto de la temperatura en las características físicas, sensoriales y químicas, según investigaciones realizadas.

Tabla 13. Efecto de la temperatura de secado en los granos de cacao deshidratados

Temperaturas	Tipo de secado que se origina	Físico	Sensorial	Químico
> 60 °C	Secado acelerado	Endurecimiento de la testa	Alto contenido de ácidos acético, propiónico, butírico, isobutírico e isovalérico,	Perdida de 70 % de polifenoles
40 a 54 °C	Secado controlado-pausado	Desprendimiento de cascarilla, porcentajes de humedad de 7 a 8 %	Liberación de ácidos, presencia de sabores específicos, menor intensidad de sabores amargos y astringentes	Conservación de polifenoles
Condiciones de lluvia y humedad	secado lento	Contaminación de hongos	Sabores indeseados, hongo, pizarroso	Conservación de polifenoles

Fuente: Elaboración propia con base en Dina et al. (2015)

El secado de la guayaba

Durante la deshidratación de la pulpa, rodajas o trozos de guayaba es probable que se produzcan alteraciones en las propiedades fisicoquímicas, principalmente en los sólidos solubles totales (SST) o grados Brix, así como en el porcentaje de acidez total titulable (ATT); en propiedades nutricionales como la cantidad de vitamina C (mg/100 g de pulpa) y en características sensoriales, especialmente en el color de la pulpa. Por lo tanto, es importante conocer los valores de referencia de estas propiedades en frutos de guayaba de los cultivares más destacados en Colombia antes de iniciar el proceso de deshidratación (tabla 14).

Tabla 14. Valores de referencia de las propiedades fisicoquímicas de frutos de guayaba de diferentes cultivares comerciales

Nombre del cultivar	Peso promedio del fruto (g)	Sólidos solubles (°Brix)	Acidez (%)	Índice de madurez	Vitamina C (mg/100 g de pulpa)	Color de la pulpa	Fuente
Guayaba Pera o Palmira ICA-1	180	11,3	0,53	21,7	40,2	Rosado	Ocampo et al. (2011)
Guayaba regional roja	50 a 99	10-14	0,3-0,5	20-30	80-100	Rojo intenso	Solarte et al. (2010)
Guayaba regional blanca	60 a 85	8-12	0,4-0,7	12-20	50-70	Blanco a amarillo claro	Solarte et al. (2010)
Guayaba manzana	350	5,7-9,9	Sin registro	Sin registro	62,6-342,1	Verde claro a amarillo claro	Parra Coronado (2015)
Corpoica Carmín 0328	93,2	13,1	0,5	14,7	45,4	Rojo	Carabalí Muñoz et al. (2017)
Corpoica Rosa C	127	10,8	0,7	26,7	80,9	Rosado	Carabalí Muñoz et al. (2017)

Fuente: Elaboración propia

Durante el secado de la guayaba, se recomienda evaluar los parámetros mencionados e incluir otros de interés, ya que proporcionan información sobre las características del nuevo producto y el grado de conservación con respecto a la fruta. A continuación, se describen algunos de estos parámetros:

- **Contenido de humedad:** debe ser menor al 20 % (wb), dado que en el proceso se elimina gran parte del agua y la humedad es un factor determinante en la estabilidad de las propiedades biofuncionales de los sólidos de guayaba deshidratada (Barbosa et al., 2010). Además, con la deshidratación se reduce el crecimiento de microorganismos. Adicionalmente, si se almacena adecuadamente en un lugar fresco y seco, el producto puede prolongar su vida útil por varios meses.
- **Color:** según Barbosa et al. (2010), el color de los sólidos obtenidos por secado con aire caliente es uniforme y exhibe un tono claro

(evaluado con el valor de luminosidad L^*) y tonalidades rojas y amarillas similares a las de la fruta (según los valores calculados de a^* y b^*). Por otro lado, Castro et al. (2017) nas regiões de cultivo irrigado das diferentes regiões do país, a goiaba apresenta grande desperdício pós-colheita, associado ao rápido amadurecimento, necessitando da aplicação de técnicas de processamento que diminuam o desperdício deste fruto. Objetivou-se, neste trabalho, estudar o processo de transferência de massa durante a desidratação osmótica de fatias de goiaba, além de avaliar os parâmetros sensoriais da goiaba-passa obtida sob diferentes temperaturas de processo e concentrações de sacarose. Fatias de goiaba cv. Paluma ($3,0 \times 2,0 \times 0,9$ cm) indican que el color puede tornarse más oscuro en comparación con la fruta fresca debido a reacciones químicas y cambios en la estructura de los pigmentos durante el proceso de deshidratación.

- **Vitamina C:** la vitamina C se mide en miligramos por 100 gramos de pulpa y es un indicador clave de la calidad del producto. Según Guerra et al. (2015), se observa una reducción del contenido de vitamina C, dependiendo de las diferentes temperaturas empleadas para el secado: a 30°C , 135 mg/100 g (temperatura de bulbo seco [DB]); a 40°C , 173,07 mg/100 g (DB); a 50°C , 114,27 mg/100 g (DB); a 60°C , 74,68 mg/100 g (DB), y a 70°C , 73,03 mg/100 g (DB). Por otro lado, Barbosa et al. (2010) reportaron un contenido de vitamina C de 118,65 mg de ácido ascórbico/100 g de fruta o de sólido después de secar la pulpa con aire caliente. Estrada et al. (2018) señalan que la vitamina C se considera un indicador crítico de la calidad en la elaboración de alimentos, debido a su baja estabilidad durante los procesos térmicos. Esta afirmación es respaldada por Hincapié Llanos et al. (2011), quienes encontraron una degradación de este compuesto entre 64,02 % y 74,98 % a temperaturas de secado entre 50°C y 60°C .

En la tabla 15 se presentan valores de referencia obtenidos en guayabas cultivadas en la Costa Atlántica Colombiana que fueron sometidas a dos procesos de deshidratación, con lo cual es posible detallar el nivel de variación de algunas propiedades de los alimentos obtenidos, como guayaba fresca, polvo y guayaba osmodeshidratada. De ahí la importancia de contar con evaluaciones de seguimiento antes, durante y después del procesamiento de las pulpas o frutos de guayaba.

Tabla 15. Valores de referencia de algunos parámetros fisicoquímicos para la guayaba fresca, en polvo y osmodeshidratada

Parámetros	Guayaba fresca	Guayaba en polvo	Guayaba osmodeshidratada
% Humedad	84,10	5,85	62,68
% Fibra cruda* y dietaria**	0,52*	44,44**	7,25**
Ca (mg/100g)	15,85	65,56	15,82
Fe (mg/100g)	<0,25	0,93	<0,25
Vitamina C (mg/100g)	41,59	87,21	<1,87

Fuente: Elaboración propia con base en Estrada et al. (2018)

Por otro lado, es importante conocer o evaluar los aspectos sensoriales de la guayaba deshidratada con el objetivo de lograr un aspecto atractivo; el sabor dulce y característico de la guayaba; el aroma agradable y característico de la fruta y la ausencia de aditivos artificiales, conservantes u otros ingredientes no deseados. Normalmente, estas variables requieren de un panel de expertos que califiquen de manera cuantitativa estas propiedades.

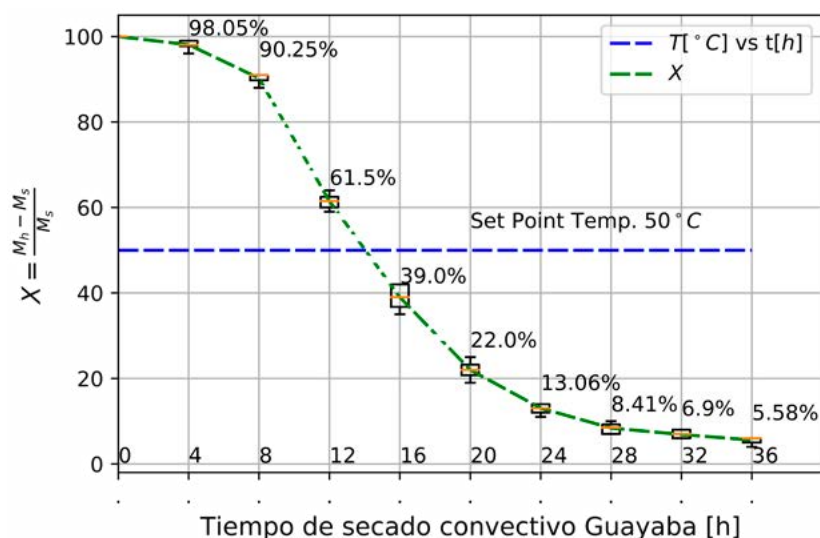


Figura 16. Curva de secado rodajas de guayaba expresada en % humedad versus tiempo (50 °C - 2m/s).

Fuente: Elaboración propia

La figura 16 muestra el comportamiento típico del secado de rodajas de guayaba bajo condiciones de 2 m/s de velocidad de aire y una temperatura de secado de 50 °C. Se observa una línea horizontal azul que

representa la temperatura del aire de secado, mientras que la línea verde muestra la tendencia de reducción del porcentaje de humedad (% h) en función del tiempo para varias muestras de guayaba en forma de rodaja. Cada *boxplot* representa el conjunto de datos de diferentes pruebas realizadas en un tiempo específico de secado. Gracias a este arreglo, se puede inferir la curva de comportamiento del secado.

Implementación de protocolos experimentales

Los estudios del proceso de secado de productos agroalimentarios proporcionan información crucial sobre su calidad, ya que mediante pruebas de laboratorio permiten caracterizar los efectos que diferentes condiciones del aire de secado tienen en los atributos finales del material, ya sea utilizando un secador o un deshidratador. Otro aporte significativo se relaciona con la cinética del proceso, la cual, como se ha mencionado anteriormente, describe la variación del contenido de humedad del material en función del tiempo. Esta relación está influenciada en los procesos de secado reales por el tipo de material, el contenido de humedad del aire, el contenido de humedad del producto, la geometría del producto y las características operativas del secador utilizado.

Por lo tanto, el uso de la unidad experimental con los dos enfoques expuestos requiere protocolos basados en estándares y procedimientos ampliamente aceptados por la comunidad científica. A continuación, se presenta un recuento detallado de los métodos adoptados para las pruebas con muestras de guayaba y cacao provenientes del departamento de Santander.

Curvas de secado de materiales agroindustriales

Existen cuatro métodos básicos para obtener la información para reconstruir la curva de secado de un producto (Kemp et al., 2001). En el primer método, se toman muestras de la unidad de secado a intervalos de tiempo definidos para determinar su contenido de humedad

aplicando métodos de laboratorio, o bien, la muestra se pesa y luego se reintroduce en la unidad. El segundo método requiere un registro continuo del peso de la muestra mediante un sistema ubicado dentro de la unidad experimental que ayuda a mantener el flujo de aire de secado en la zona de medición. En el tercer método, conocido como pesado intermitente, se interrumpe el flujo de aire dentro de la zona de secado mientras se realiza la medición del peso de la muestra. Por último, se encuentran los métodos indirectos, en los cuales se cuantifica la cantidad de humedad retirada en forma de vapor en lugar de medir el peso directamente. Para esto, se utilizan instrumentos como el analizador infrarrojo de gases.

Como es de esperar, cada método tiene sus ventajas y desventajas, las cuales dependen en gran medida de la configuración del aparato experimental. La unidad de secado desarrollada en este proyecto está diseñada para obtener datos sobre la cinética de secado mediante los métodos continuo e intermitente. Dependiendo del tipo de material, dentro de la unidad de secado se pueden disponer una sola muestra o un arreglo de muchas muestras distribuidas en una capa fina o gruesa, con un flujo de aire paralelo.

Es importante destacar que, según la literatura, al analizar una muestra unitaria dentro de un túnel de secado, la relación señal-ruido suele ser baja, lo que puede resultar en una curva de humedad con una dispersión significativa de la información. Por otro lado, al disponer las muestras en capas se obtienen curvas menos dispersas, pero se podría obtener menos información fundamental sobre la cinética del proceso de secado.

En cuanto al efecto de la velocidad del aire dentro del túnel, el estudio de las partículas en capas es más representativo para materiales secados en equipos de transporte neumático o en equipos rotativos. Por el contrario, el estudio de muestras individuales es útil para materiales de tamaño pequeño secados a bajas velocidades. En estos casos, el sistema de sujeción de la muestra en el flujo de aire es un aspecto importante para mejorar la calidad de la información obtenida.

Ahora bien, el registro del peso (equivalente a la masa) de las muestras se traduce en curvas de secado al determinar el contenido de humedad para cada instante de tiempo a lo largo de la prueba. Este contenido de humedad está definido como la masa de agua en el producto por unidad de masa de sólidos secos, es decir:

$$X = \frac{M_h - M_s}{M_s}$$

La masa seca (M_s) se determina al finalizar la prueba cuando no se observan cambios significativos en el peso de la muestra dentro de la sección de secado. Para esto, se utiliza un equipo analizador de humedad que emplea el método termogravimétrico con temperaturas entre 50 °C y 160 °C, o se realiza un análisis de laboratorio conocido como método de desecación por estufa, mediante el cual la muestra se calienta por encima de 100 °C (entre 105 °C y 130 °C) durante al menos 10 minutos. Luego, se deja reposar el material entre 2 y 3 minutos y se pesa nuevamente para determinar la masa seca. El registro gráfico de los valores de humedad de productos alimenticios obtenidos como una función discreta del tiempo presenta la forma general que se observa en la figura 17.

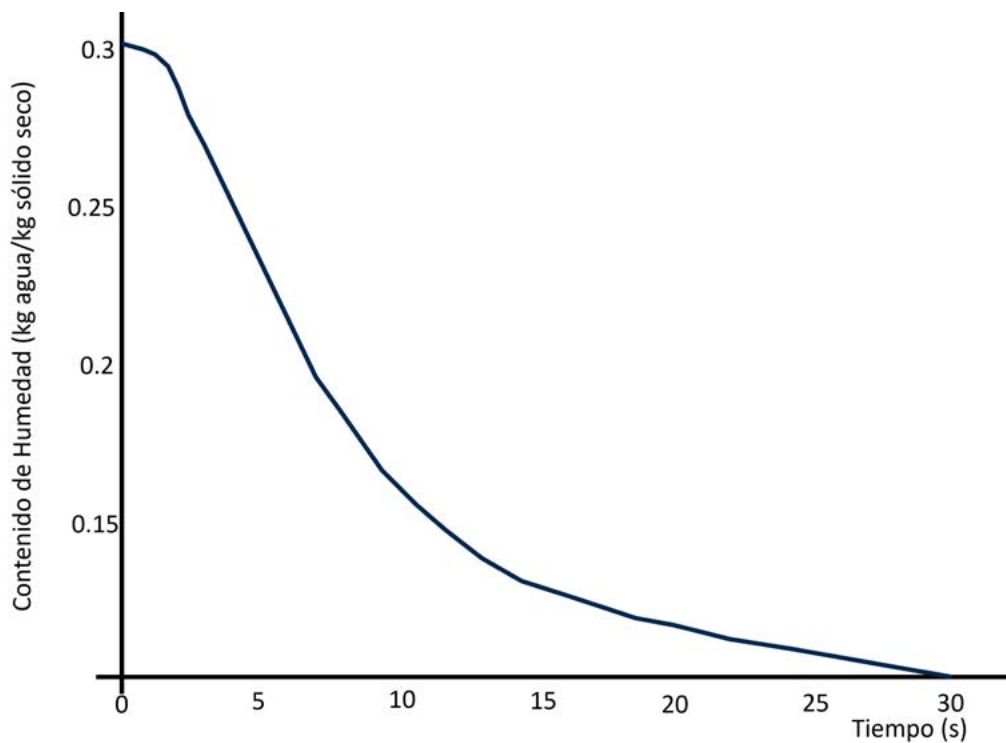


Figura 17. Curva típica de secado de un producto agroindustrial.

Fuente: Elaboración propia con base en Kemp et al. (2001)

Para graficar estas curvas se siguen unas estrategias que permiten utilizar adecuadamente los datos experimentales. Las estrategias se describen a continuación:

1. Graficar todos los datos de humedad para los instantes de tiempo analizados eliminando puntos extremos o anómalos.
2. Si se requiere obtener una curva continua, se puede utilizar un método de promediado con los puntos adyacentes. Además, para suavizar la curva se puede emplear un método de ajuste basado en segmentos de recta (*splitline fit*). Es importante diferenciar numéricamente las discontinuidades significativas, que son características de un ajuste deficiente.
3. Se puede utilizar un ajuste polinomial (empleando hasta cinco puntos consecutivos) para suavizar la curva obtenida. Los valores ajustados para el contenido de humedad se evalúan en cada punto experimental.
4. Finalmente, se pueden utilizar diferentes programas de computadora que consideren modelos teóricos o semiempíricos (previamente desarrollados y validados con productos agroindustriales) que hayan demostrado buena capacidad predictiva. En este caso, se puede seguir un proceso de identificación paramétrica basado en métodos de optimización.

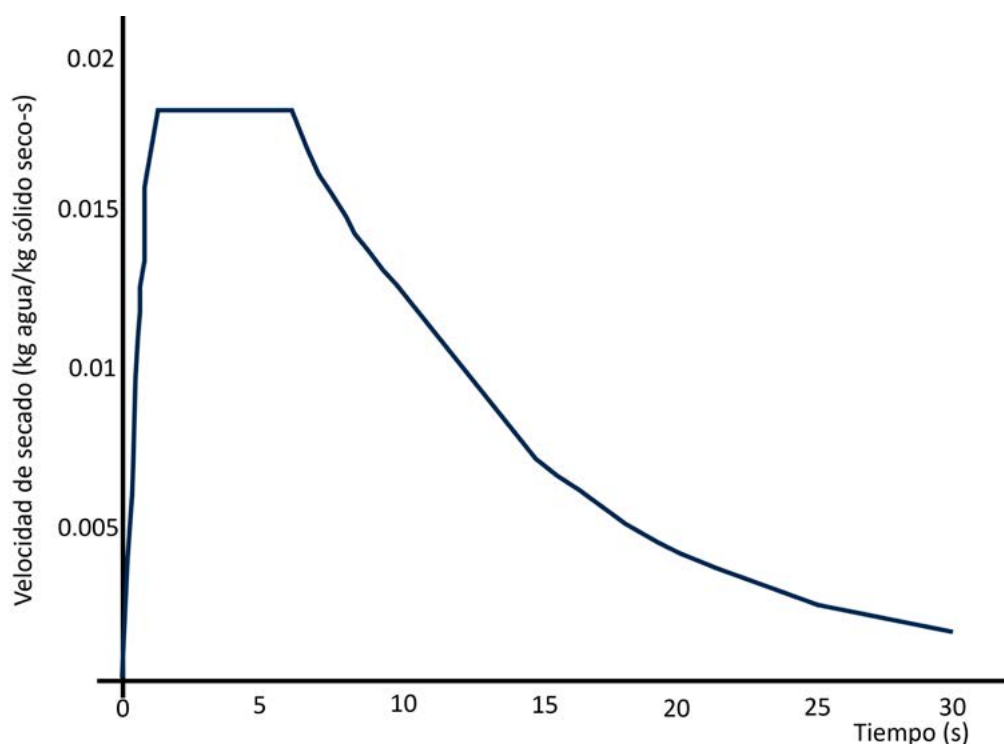


Figura 18. Curva de la razón de cambio del contenido de humedad versus el tiempo.

Fuente: Elaboración propia con base en Kemp et al. (2001)

La figura 18 y la figura 19 muestran otras dos curvas utilizadas con frecuencia en el secado de alimentos. La primera es la razón de cambio de la humedad ($\frac{dX}{dt}$) con respecto al tiempo (t) y la segunda la misma razón de cambio pero con respecto al contenido de humedad (X). Estas se obtienen a partir de los datos de la curva típica de secado mediante derivación numérica (utilizando el método de las diferencias finitas, por ejemplo). Las estrategias para su ajuste y suavizado son esencialmente las mismas que se describieron en el apartado anterior.

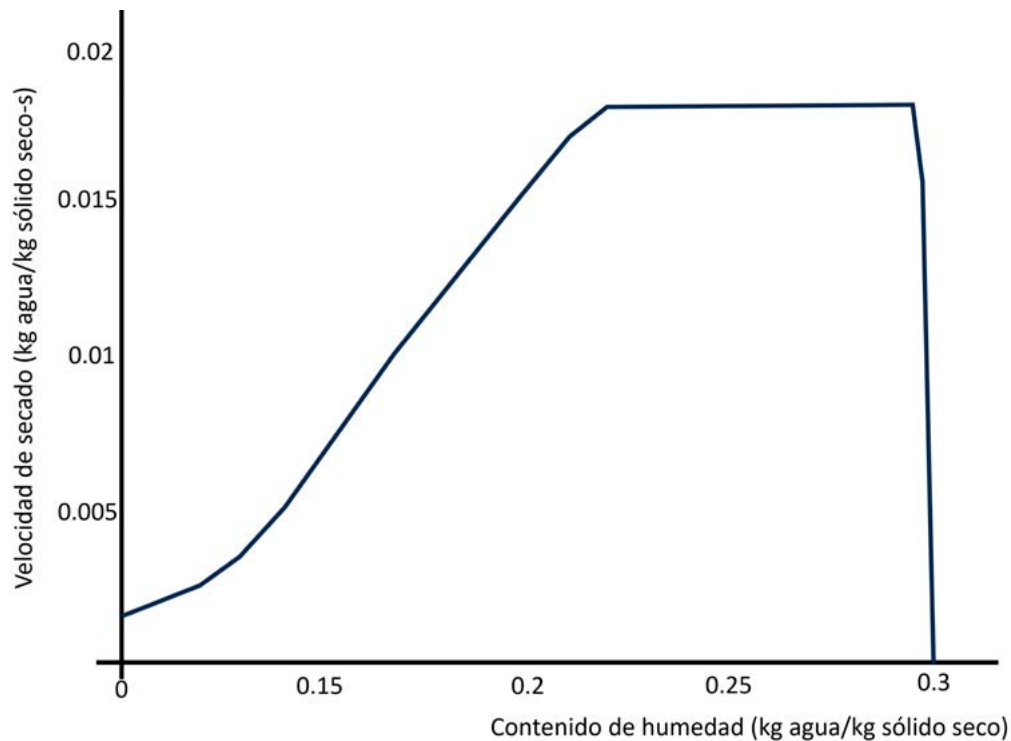


Figura 19. Curva de la razón de cambio del contenido de humedad versus el contenido de humedad.

Fuente: Elaboración propia con base en Kemp et al. (2001)

Control de variables de proceso para la elaboración de curvas de secado en el dispositivo desarrollado

La figura 18 mencionada en la sección anterior representa una de las curvas utilizadas para visualizar la relación entre el cambio de la

humedad y el cambio del peso a lo largo del tiempo. En el dispositivo experimental desarrollado en este proyecto se ha programado y utilizado una curva de secado convectivo basada en el concepto discutido anteriormente. Esta curva permite emular condiciones climáticas similares a las de San Vicente de Chucurí (Santander) durante las primeras horas y mantener una temperatura constante después de las 48 horas. Esto se hace con el fin de reducir el riesgo de saturación de las estructuras superficiales con grasa y permitir una deshidratación adecuada.

La curva de la figura 20 muestra una rampa de temperatura programada para iniciar el proceso con 28 °C durante 16 horas que se eleva a 38 °C y 34 °C durante 4 horas respectivamente, seguido de un periodo de 16 horas a 28 °C. La fase final del proceso se lleva a cabo a 40 °C durante 48 horas. Los puntos de análisis de la humedad del grano en la curva de temperatura de referencia se toman a las 0h, 16h, 24h, 36h y 84h.

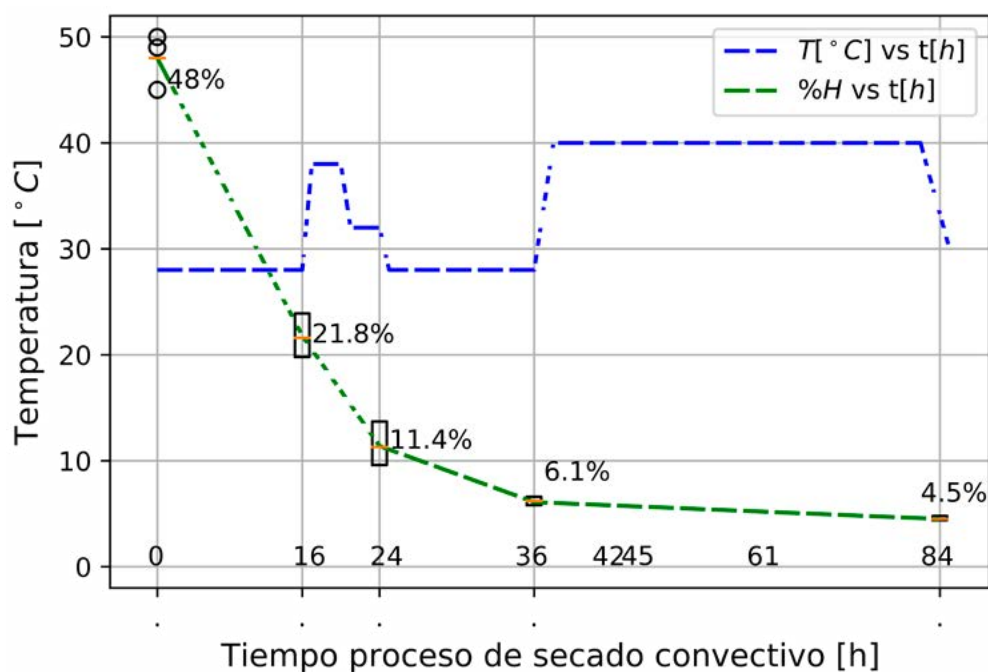


Figura 20. Rampa temperatura de secado versus el porcentaje de humedad del grano.

Fuente: Elaboración propia

Para ello, se diseñó un experimento para determinar la humedad del grano, con tres repeticiones de tres grupos. Se observa una efectiva tendencia de secado del grano en 4 días con bajas temperaturas, lo que

contribuye a obtener un porcentaje de humedad cercano al 5 % (WB). Los valores medios de pH en estos puntos corresponden a 6,391, 6,208, 6,091 y 6,168, respectivamente, lo cual indica una afectación prácticamente nula del pH durante el proceso, con una ligera tendencia a reducirlo, lo cual es deseado en un proceso de secado de cacao.

Capítulo IV

Prospectiva



El objetivo de este trabajo fue desarrollar un sistema o equipamiento de apoyo a la investigación para observar y analizar parámetros eficientes en el proceso de secado de diversos productos agrícolas de la región. Inicialmente, se utilizaron dos productos característicos de la región, ampliamente estudiados, que permitieron establecer puntos de comparación del proceso implementado y de las técnicas utilizadas en los procesos de secado. Estas actividades se desarrollaron desde dos perspectivas principales: la primera, desde el uso de energía para cumplir con los requerimientos del proceso de secado; y la segunda, desde una perspectiva de calidad del producto seco a través de la cual se pretendió establecer puntos eficientes del proceso manteniendo la calidad nutricional de los productos desarrollados. Así, para el caso del secado de guayaba, el objetivo es mantener los contenidos de grados Brix, vitamina C y color, mientras que en el caso del secado del cacao el objetivo es conservar el perfil sensorial, los grados Brix y las grasas totales.

El sistema fue equipado con una serie de sensores y actuadores para controlar y automatizar el proceso de secado, además, se establecieron algoritmos de control y supervisión para análisis y reportes posteriores de los experimentos. El proceso de control está diseñado para mantener los parámetros de experimentación en relación con las características físicas del aire (temperatura, humedad, velocidad) y la exposición a la radiación infrarroja mediante el uso de lámparas cerámicas. Además, la cámara de experimentación monitoriza magnitudes físicas del producto como la temperatura de superficie (sensor infrarrojo de temperatura), color (sensor CCD) y peso de la muestra (módulo Siemens Siwarex). Estas variables están correlacionadas con las propiedades químicas y nutricionales del producto.

El proceso tradicional de secado mecánico fue abordado desde una perspectiva general para establecer parámetros físicos de calidad del aire manteniendo el seguimiento del peso de la muestra a lo largo del tiempo. En línea con esta tradición, el objetivo del presente proyecto fue mantener la calidad del producto como parámetro de control correlacionando los datos de calidad del producto y las variables de control. En este sentido, se busca que los avances tecnológicos en los procesos de secado de productos agrícolas incorporen las recomendaciones derivadas de estos instrumentos de apoyo a la investigación en el diseño de equipos para el proceso de secado. Esto implica que se mantenga como eje central de su estrategia la calidad nutricional del producto en lugar del balance de masa.

Referencias

- Abhay, S. M., Hii, C. L., Law, C. L., Suzannah, S., & Djaeni, M. (2016). Effect of hot-air drying temperature on the polyphenol content and the sensory properties of cocoa beans. *International Food Research Journal*, 23(4), 1479-1484.
- Aguilar, H. (2016). *Manual para la evaluación de la calidad del grano de cacao*. Fundación Hondureña de Investigación Agrícola. http://www.fhia.org.hn/descargas/Proyecto_de_Cacao_SECO/Manual_para_la_Evaluacion_de_la_Calidad_del_Grano_de_Cacao.pdf
- Ahmed, N. A. (2013). *Wind Tunnel Designs and Their Diverse Engineering Applications*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/3403>
- Alean, J., Chejne, F., & Rojano, B. (2016). Degradation of polyphenols during the cocoa drying process. *Journal of Food Engineering*, 189, 99-105. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.05.026>
- Barbosa, H., Morales, A. L., Osorio, C., & Jiménez, A. (2010). Deshidratación de la guayaba, una opción para su aprovechamiento integral. En A. L. Morales, & L. M. Melgarejo (Eds.), *Desarrollo de productos funcionales promisorios a partir de la guayaba (Psidium guajava L.) para el fortalecimiento de la cadena productiva* (pp. 125-138). Universidad Nacional de Colombia.
- Carabalí Muñoz, A., Jaramillo Laverde, A., Correa Moreno, D. L., Ocampo Osorio, L. A., Prada Forero, L. E., Caicedo Arana, Á., Grajales Guzmán, L. C., Montes Prado, M., Carmen Carrillo, H., & Rodríguez Henao, E. (2017). *Corpoica Carmín 0328 y Corpoica Rosa C.: nuevas variedades de guayaba con alto rendimiento y calidad nutricional e industrial*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/11554>
- 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>
- Castro, D. S. D., Silva, W. P. D., Gomes, J. P., Aires, J. E. F., Aires, K. L. C. D. A. F., & Silva Junior, A. F. D. (2017). Desenvolvimento e avaliação sensorial de goiaba-passa desidratada osmoticamente. *Brazilian Journal of Food Technology*, 21(0). <https://doi.org/10.1590/1981-6723.1316>
- Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [AGROSAVIA], Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación, & 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>
- Dina, S. F., Ambarita, H., Napitupulu, F. H., & Kawai, H. (2015). Study on effectiveness of continuous solar dryer integrated with desiccant thermal storage for drying cocoa beans. *Case Studies in Thermal Engineering*, 5, 32-40. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2014.11.003>
- Estrada, H. H., Restrepo, C. E., Saumett, H. G., & Pérez, L. (2018). Deshidratación osmótica y secado por aire caliente en mango, guayaba y limón para la obtención de ingredientes funcionales. *Información Tecnológica*, 29(3), 197-204. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642018000300197>
- Fito, P., Andrés, A. M., Barat, J. M., & Albors, A. M. (2016). *Introducción al secado de alimentos por aire caliente*. Universidad Politécnica de Valencia.
- García-Alamilla, P., Salgado-Cervantes, M., Barel, M., Berthomieu, G., Rodríguez-Jimenes, G., & García-Alvarado, M. (2007). Moisture, acidity and temperature evolution during cacao drying. *Journal of Food Engineering*, 79. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.04.005>
- García-Cáceres, R. G., Perdomo, A., Ortiz, O., Beltrán, P., & López, K. (2014). Characterization of the supply and value chains of Colombian cocoa. *DYNA*, 81(187), 30-40. <https://doi.org/10.15446/dyna.v81n186.39555>
- Guerra, A. M. S., Osorio, D. C. V., Martínez, D. C. C., & Llanos, G. A. H. (2015). Comparación de dos técnicas de deshidratación de guayaba-pera (*Psidium guajava* L.) sobre los efectos del contenido de vitamina C y el comportamiento de las propiedades técnico-funcionales de la fibra dietaria. *Revista Lasallista de Investigación*, 12(1), 11-20.
- Hauer, A. (2016). Energy Performance Comparison of Fans with Variable Speed Drives. *ASHRAE Journal*, 58(11), 52-59.
- Hii, C., Abdul Rahman, R., Jinap, S., & Man, Y. (2006). Quality of cocoa beans dried using a direct solar dryer at different loadings. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86, 1237-1243. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2475>
- Hincapié Llanos, G. A., Barajas Gamboa, J. A., & Arias Gómez, Z. (2011). Evaluación del secado por convección de la guayaba (*Psidium guajava* L.) variedad manzana. *Revista Investigaciones Aplicadas*, 5(2), 92-103. <http://hdl.handle.net/20.500.11912/7050>
- Hui, Y. H. (2008). *Food Drying Science and Technology: Microbiology, Chemistry, Applications*. DEStech Publications, Inc.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [Icontec]. (2021). *Cacao en grano. Especificaciones y requisitos de calidad* (Normas Técnica Colombiana [NTC] 1252:2021).
- International Commission of Agricultural Engineering. (1999). *CIGR handbook of agricultural engineering*. American Society of Agricultural Engineers.
- Jaimes Suárez, Y. Y., Agudelo Castañeda, G. A., Báez Daza, E. Y., Rengifo Estrada, G. A., & Rojas Molina, J. (2021). *Modelo productivo para el cultivo de cacao (Theobroma cacao L.)*

- en el departamento de Santander. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). <https://doi.org/10.21930/agrosavia.model.7404647>
- Kaveh, M., Abbaspour-Gilandeh, Y., & Nowacka, M. (2021). Comparison of different drying techniques and their carbon emissions in green peas. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 160, 108274. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.108274>
- Kemp, I. C., Fyhr, B. C., Laurent, S., Roques, M. A., Groenewold, C. E., Tsotsas, E., Sereno, A. A., Bonazzi, C. B., Bimbenet, J. J., & Kind, M. (2001). Methods for Processing Experimental Drying Kinetics Data. *Drying Technology*, 19(1), 15-34. <https://doi.org/10.1081/DRT-100001350>
- 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>
- López Cerino, I., & Chávez García, E. (2018). Eficacia de secador solar tipo túnel con cacao (*Theobroma cacao* L.) en Tabasco. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 21, 4395-4405. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i21.1528>
- Maroto, S., Montoya Rodríguez, P., González León, D., Delgado, T., Arvelo Sánchez, M. Á., & Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura [IICA]. (2017). *Manual técnico del cultivo de cacao prácticas latinoamericanas*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). <https://repositorio.iica.int/handle/11324/6181>
- Mujumdar, A. S. (2014). *Handbook of Industrial Drying*. CRC Press.
- Ndukwu, M. C. (2009). Effect of Drying Temperature and Drying Air Velocity on the Drying Rate and Drying Constant of Cocoa Bean. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 11(2009), 1-7. <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/1091/1172>
- Ocampo, L. A., Céspedes, N., Jiménez, E., & Carrillo, H. C. (2011). Clones y variedades promisorias de guayaba (*Psidium guajava* L.) en fase de establecimiento. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/1230>
- Orna Chávez, J. E., Chuquín, N., Saquina, L., & Cueva, O. (2018). Diseño y construcción de una secadora automática para cacao a base de aire caliente tipo rotatorio para una capacidad de 500 kg. *Enfoque UTE*, 9(2), 159-174. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v9n2.185>
- Ortiz de Bertorelli, L., Graziani de Fariñas, L., & Rovedas, L. G. (2009). Influencia de varios factores sobre características del grano de cacao fermentado y secado al sol. *Agronomía Tropical*, 59(2), 119-127.
- Parra Coronado, A. (2015). Maduración y comportamiento poscosecha de la guayaba (*Psidium guajava* L.). Una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 8(2), 314. <https://doi.org/10.17584/rcch.2014v8i2.3223>

- Parra Rosero, P. (2018). *Modelación de un proceso de secado de cacao utilizando una cámara rotatoria cilíndrica y flujo de aire caliente* [Tesis de doctorado, Universidad de Piura]. Repositorio institucional PIRHUA. <https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/3488>
- Pérez, M., & Contreras, J. (2017). *Instructivo para el control de calidad de granos de cacao*. Fundación Suiza para la Cooperación Técnica.
- Perry, R. H., Green, D. W., & Maloney, J. O. (2002). *Perry: manual del ingeniero químico* (Vol. 4). McGraw Hill.
- Red Cacaotera (2023). *Protocolos para procesos de cosecha y poscosecha. Secado del grano de cacao*. <https://www.redcacaotera.com.co/protocolos-para-procesos-de-cosecha-y-poscosecha/>
- Ramos, N., Castro, A., Juárez, J., Acha de la Cruz, O., Rodríguez, N., Blancas, J., Escudero, J., & Navarro, A. (2016). Evaluación de ocratoxina a en *Theobroma cacao* L. «cacao blanco» durante el proceso de cosecha, fermentado, secado y almacenado. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 82(4), 431-439.
- Solarte, M., Hernández, M., Morales, A. L., Fernández-Trujillo, J. P., & Melgarejo, L. M. (2010). *Caracterización fisiológica y bioquímica del fruto de guayaba durante la maduración*. En A. L. Morales, & L. M. Melgarejo (Eds.), *Desarrollo de productos funcionales promisorios a partir de la guayaba (Psidium guajava L.) para el fortalecimiento de la cadena productiva* (pp. 85-120). Universidad Nacional de Colombia.
- 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>
- Wang, S. K. (2000). *Handbook of air conditioning and refrigeration*. McGraw-Hill.

Anexo

Registro fotográfico de la unidad experimental en el Área de Energías Renovables Agroindustriales del Centro de Investigación La Suiza de AGROSAVIA (Rionegro, Santander).



Autoría

Ariel René Carreño Olejua

correo: acarreno@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-8818-565X>

Investigador PhD asociado de AGROSAVIA. Ingeniero mecánico de la Universidad Industrial de Santander, posgrado en Mecatrónica en la Universidad de St. Gallen (Suiza), MSc en Mecatrónica de la Universidad de Ciencias Aplicadas de Konstanz (Alemania) y doctorado en Ciencias de la Agricultura de la Universidad de Kassel (Alemania). Ha sido profesor e investigador en campos de la ingeniería como automatización y control de máquinas y procesos. Su experiencia y líneas de trabajo se enfocan en la investigación aplicada a procesos agroindustriales, el diseño de máquinas y procesos para la manipulación, transformación y conservación de productos agrícolas, automatización de máquinas y procesos industriales y agroindustriales, y uso de energía renovable fotovoltaica y térmica como soporte energético de los sistemas. Su interés se centra en el aporte que, desde las áreas del conocimiento en la que ha desarrollado su experticia, pueda contribuir al desarrollo de procesos y equipamiento agrícola para pequeña escala y de economía familiar y comunitaria, que permita el aseguramiento de calidad y trazabilidad de procesos agroindustriales en pro de su competitividad y productividad, así como el mejoramiento de condiciones de vida de pequeños productores.

Javier Mauricio Castellanos Olarte

Correo: jmcastellanos@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2187-7798>

Ingeniero mecánico de la Universidad Industrial de Santander y magíster en Ciencias Térmicas y Energía de la Escuela Central de Lyon. Ha sido profesor e investigador en el campo de las máquinas térmicas alternativas, procesos de secado de productos agroindustriales y desarrollo de herramientas agrícolas. Actualmente es candidato a doctor en Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander y docente de pregrado de la misma institución.

Lucero Gertrudis Rodríguez SilvaCorreo: lgrodriguez@agrosavia.coOrcid: <https://orcid.org/0000-0001-9454-7821>

Investigador Master de AGROSAVIA. Profesional agroindustrial de la Universidad Industrial de Santander (UIS) y magíster en Biotecnología Alimentaria de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) de Bucaramanga. Juez experto en análisis sensorial de alimentos con énfasis en licor de cacao, con participación en el panel colombiano de jueces en productos de chocolatería y licor de cacao, lo que le ha permitido evaluar muestras en concursos nacionales e internacionales. Líder y formadora del panel sensorial del Centro de Investigación La Suiza, analista de variables morfológicas, físicas, químicas y sensoriales de materiales genéticos de cacao, incorporación de procesos y técnicas de laboratorio en función de métodos de caracterización, cosecha, poscosecha, así como procesos agroindustriales acorde a los estándares de calidad internacional. Actualmente se desempeña desarrollando actividades de conservación del banco de germoplasma vegetal de las especies cacao y caña, caracterización morfológica, física, química y organoléptica de genotipos de cacao e implementación de estrategias y desarrollo de equipamiento para procesos de poscosecha y agroindustria en cacao.

Fabricio Eulalio Leite CarvalhoCorreo: fcarvalho@agrosavia.coOrcid: <https://orcid.org/0000-0001-7815-0082>

Investigador PhD Asociado de AGROSAVIA. Biólogo de la Universidad Federal de Ceará (UFC, Brasil), magíster y doctorado en Bioquímica Vegetal de la misma institución, con énfasis en Fisiología Vegetal, y con un periodo de pasantía en la Queen Mary University of London. Fue investigador posdoctoral durante cuatro años en el Departamento de Bioquímica y Biología Molecular de Plantas de la UFC y profesor externo invitado, impartiendo las clases de Fisiología Vegetal, Biología Molecular y Mecanismos Integrados para la Eficiencia de la Fotosíntesis. Actualmente es investigador PhD del Centro de Investigación La Suiza de AGROSAVIA. Tiene experiencia de investigación relacionada con respuestas de plantas cultivadas a estreses abióticos, mecanismos de regulación de la eficiencia fotosintética, metabolismo de especies reactivas de oxígeno en plantas, metabolismo vegetal del nitrógeno y procesos de interacción entre estreses bióticos y abióticos. Actualmente es miembro del consejo editorial de las revistas *Environmental and Experimental Botany* (2019-), *Archives of Agronomy and Soil Science* (2017-), *Frontiers in Plant Science* (2020-) y *Biotech Studies* (2020-).

Leidy Yibeth Deantonio Florido

Correo: ldeantonio@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8520-1340>

Ingeniera agrónoma de la Universidad Nacional de Colombia y MSc en Fisiología Vegetal de la Universidade Federal de Viçosa (Brasil). Investigadora Máster de la sede Cimpa adscrita al Centro de Investigación Tibaitatá de AGROSAVIA. Ha participado y liderado proyectos de investigación y transferencia de tecnología en temas relacionados con zonificación de riesgos agroclimáticos en los sistemas agrícolas de Colombia, y optimización de la producción de semilla seleccionada para caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) destinada a panela y al fortalecimiento de sus organizaciones de productores. Lidera los estudios ecofisiológicos sobre la interacción de los agentes bióticos y abióticos con los cultivares regionales de guayaba roja y blanca (*Psidium guajava* L.) en Santander y Boyacá (Colombia). Actualmente apoya los enfoques de bioeconomía (energías renovables), agricultura climáticamente inteligente y crecimiento verde desde el Grupo de Investigación en Frutas del Trópico.

Este libro se editó en
Mosquera, Cundinamarca,
y se imprimió en
Bogotá, Colombia,
en enero de 2025.

Los procesos de poscosecha de productos agroindustriales permiten garantizar su inocuidad, prolongar el tiempo de conservación antes de su procesamiento o uso, y mantener los atributos de calidad de cara al consumidor final. La configuración de procesos óptimos para lograr estos objetivos se apoya en actividades de investigación aplicada que requiere medios experimentales adecuados. Con este enfoque y como parte de los entregables del proyecto “Fortalecimiento de las capacidades en Ciencia, Tecnología e Innovación del Centro de Investigación La Suiza para el desarrollo de proyectos en 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 como soporte a la investigación de procesos de secado de productos agroindustriales. Las características técnicas de este dispositivo se orientan a la evaluación del secado de múltiples productos agroindustriales de la región, especialmente aquellos destinados a la producción de alimentos. Si bien su aplicación inicial se dirigió al estudio del secado de granos de cacao y de frutos de guayaba, dos de las cadenas productivas agrícolas priorizadas para Santander, el equipo fue concebido para el estudio de cualquier producto agroindustrial.

Este documento divulga el proceso metodológico utilizado para diseñar la unidad experimental y cada uno de los componentes y subsistemas asociados, para que la comunidad científica del sector agroindustrial del país pueda evaluar la herramienta desarrollada y los aspectos básicos de los productos priorizados que sirvieron de base para su materialización como equipo experimental.

www.agrosavia.co



BIBLIOTECA AGROPECUARIA DE COLOMBIA

Correo: bac@agrosavia.co

Teléfono: (+57 601) 4227300 ext. 1257 o 1274

Skype: biblioteca.agropecuaria

ISBN: 978-958-740-787-7



Distribución gratuita
Prohibida su venta