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 secado (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 ( ), 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 mm -1 μm). 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 (m^2)	●		
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 especifica	●	
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.

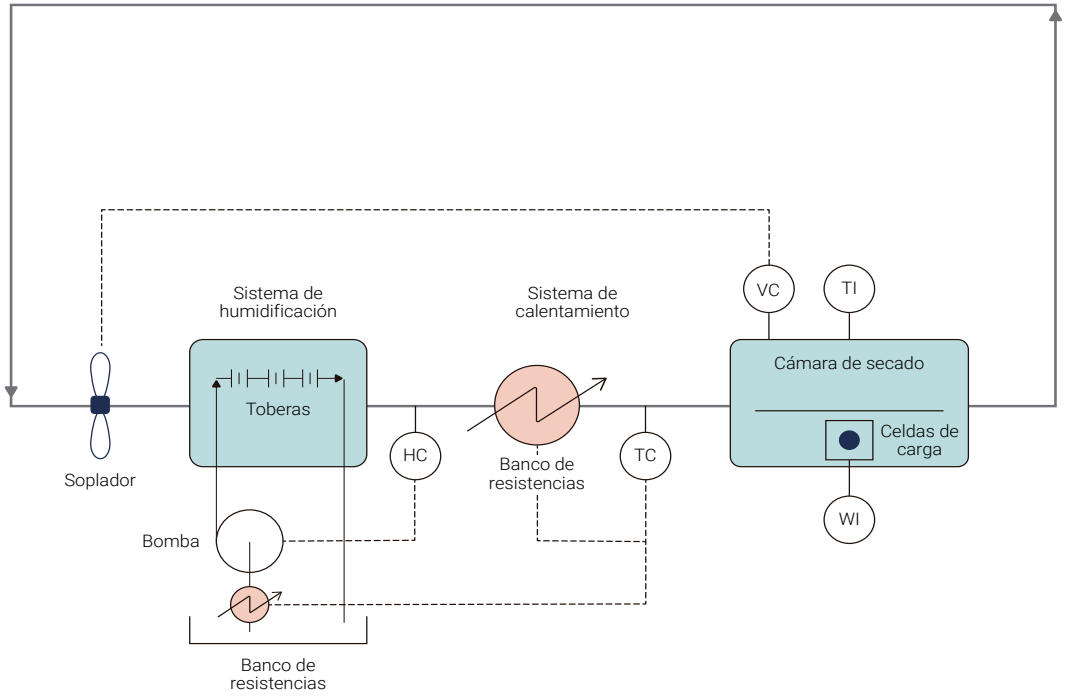

Figura 1. Modelo conceptual de la unidad experimental.

Fuente: Elaboración propia

SIEMENS
SIMATIC HMI
AERoA: Area de Energias Renovables Aplicadas
AGROSAVIA
Centro de Investigación La Suiza
TOUCH
EMERGE