



El control automático como una herramienta tecnológica para el mejoramiento de procesos de deshidratación de productos agroindustriales

Vázquez Espinosa, Neftalí; Beltrán Carbajal, Francisco; Ramírez Muñoz, Jorge; González Bravo, Humberto Eduardo
El control automático como una herramienta tecnológica para el mejoramiento de procesos de deshidratación de productos agroindustriales

CIENCIA *ergo-sum*, vol. 31, 2024 | e256

Espacio del Divulgador

Universidad Autónoma del Estado de México, México

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.



Vázquez Espinosa, N., Beltrán Carbajal, F., Ramírez Muñoz, J. y González Bravo, H. E. (2024). El control automático como una herramienta tecnológica para el mejoramiento de procesos de deshidratación de productos agroindustriales. *CIENCIA ergo-sum*, 31. <http://doi.org/10.30878/ces.v31n0a41>

El control automático como una herramienta tecnológica para el mejoramiento de procesos de deshidratación de productos agroindustriales

Automatic Control as a Technological Tool for Improvement of Agro-industrial Products Dehydration Processes

Neftalí Vázquez Espinosa

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, México

al2203803241@azc.uam.mx

 <https://orcid.org/0000-0002-5569-0729>

Recepción: 28 de marzo de 2023
Aprobación: 7 de septiembre de 2023

*Francisco Beltrán Carbajal**

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, México

fbeltran@azc.uam.mx

 <https://orcid.org/0000-0001-5244-5587>

Jorge Ramírez Muñoz

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, México

jmr@azc.uam.mx

 <https://orcid.org/0000-0003-1780-6185>

Humberto Eduardo González Bravo

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, México

hegb@azc.uam.mx

 <https://orcid.org/0000-0002-5679-2671>

RESUMEN

Se describe el proceso de secado de productos agroindustriales, tales como el kiwi, aguacate, plátano, col rizada y chile rojo. Además, se propone el diseño de una nueva técnica de control basado en el rechazo activo de perturbaciones para regular la temperatura que el secado requiere para la deshidratación de estos productos en un secador híbrido solar-gas LP tipo túnel. Los resultados de las simulaciones confirman la eficiencia de la técnica de control para la regulación de la temperatura en el proceso. El control desarrollado no solo asegura el funcionamiento óptimo de la planta, sino que también elimina riesgos de rechazo de lotes de producto seco por incumplimiento de las especificaciones de calidad.

PALABRAS CLAVE: proceso de secado, productos agroindustriales, control, regulación de temperatura.

ABSTRACT

The drying process of agro-industrial products such as kiwi, avocado, banana, kale, and red chili is described. Additionally, it proposes the design of a new control technique based on active disturbance rejection to regulate the temperature required for the dehydration of these products in a hybrid solar-LP gas tunnel-type dryer. The simulation results confirm the effectiveness of the control technique in regulating the temperature during the process. Furthermore, they demonstrate that the developed control not only ensures optimal plant operation but also mitigates the risks of rejecting batches of dried products due to non-compliance with quality specifications.

KEYWORDS: drying process, agricultural products, control, regulation of temperature.

***AUTOR PARA CORRESPONDENCIA**

fbeltran@azc.uam.mx

INTRODUCCIÓN

El secado o deshidratación es el método más antiguo de preservación de alimentos practicado por la humanidad, aunado a que es el proceso más comúnmente usado para la preservación de frutas y verduras. El principal objetivo del secado de productos es la reducción de su contenido de humedad hasta un nivel que permita almacenarlo de forma segura durante un periodo extendido (Belessiotis y Delyannis, 2011). Por tradición, se prefiere el secado a cielo abierto debido a que su costo de operación y distribución es bajo. Sin embargo, los tiempos prolongados de secado tienen inconvenientes por razones económicas, a la vez que incrementan el riesgo de contaminación y descomposición del producto por la exposición con el ambiente (Doymaz, 2005). Otra técnica muy utilizada es la deshidratación convectiva, donde el calor es transferido al sólido por una corriente de flujo natural, o bien mediante una corriente forzada de aire caliente mediante ventiladores o extractores (Ruangurai *et al.*, 2020). El proceso de secado busca reducir la cantidad de agua de un producto, pero manteniendo su calidad y propiedades nutricionales. Sin embargo, esto no suele pasar cuando se expone a temperaturas de aire elevadas e incontroladas (Mohammed *et al.*, 2020). Por lo anterior, el proceso de deshidratación debe ser controlado de forma eficiente. En este sentido, resulta indispensable determinar los parámetros que rigen el proceso, los cuales están estrechamente vinculados a la cinética de secado de cada producto específico, al rendimiento del secador y a la calidad del producto final (Mohana *et al.*, 2020).

En el ámbito industrial la mayor parte de los equipos deshidratadores utilizan energía fósil como principal fuente de energía. Sin embargo, en la actualidad el uso de energía solar se muestra como una alternativa promisoría que permite subsanar los inconvenientes que las energías convencionales presentan. El uso de colectores solares para calentar el aire es cada vez más común en los sistemas de secado (Daş *et al.*, 2021). Las principales desventajas de los secadores solares son el tiempo limitado de radiación solar y la corta temporada de cosecha de muchos productos. Se tiene referencia de que el deshidratador de tipo túnel representa la tecnología empleada mayoritariamente para la deshidratación de productos alimenticios. Algunas razones son su nivel de inversión inicial y bajo mantenimiento, velocidad de secado, uniformidad de deshidratación, condiciones de higiene, entre otros aspectos esenciales para la industria de secado (Doymaz y Pala, 2002). Sin embargo, pocos esfuerzos se dedican en el área de monitoreo y control automático, los cuales permiten llevar a cabo de manera eficiente el proceso y alcanzar los valores de contenido de humedad deseados en las plantas de deshidratación (Porciello y Doerr, 1999).

En este artículo de divulgación se presenta el diseño de un nuevo controlador basado en el rechazo activo de perturbaciones (ADRC, Active Disturbance Rejection Control) aplicado a un secador híbrido solar-gas LP tipo túnel con el objetivo de regular la temperatura requerida para la deshidratación eficiente de una clase importante de productos agroindustriales. También, se describe el proceso de secado, así como los diversos tipos de secadores más empleados con el propósito de guiar el diseño del controlador. El controlador propuesto permite regular la temperatura de aire para garantizar la deshidratación del producto manipulando el flujo de calor bajo la presencia de perturbaciones. Se desarrollan diversos casos de estudio para mostrar la efectividad del esquema de control para regular el proceso de deshidratación de kiwi, aguacate, plátano, col rizada y chile rojo. Los resultados de simulación computacional muestran un buen desempeño de la estrategia de control propuesta para la deshidratación eficiente de productos agroindustriales.

1. PROCESO DE SECADO

El secado es la operación unitaria en donde se elimina la humedad (usualmente agua) de materiales de proceso y de otras sustancias (Geankoplis, 2009). En el secado, el agua por lo regular se elimina en forma de vapor con aire caliente. En casos específicos, el agua se puede retirar de los materiales sólidos mediante métodos mecánicos, por ejemplo por medio de prensas, centrifugas y otros métodos.

La deshidratación de materiales biológicos (en especial alimentos) se usa también como técnica de preservación. Los microorganismos responsables de la descomposición de los alimentos no crecen ni se multiplican en ausencia de agua. Además, muchas de las enzimas que causan los cambios químicos en alimentos y otros materiales biológicos no son capaces de funcionar de manera adecuada sin agua. Los microorganismos pierden su actividad una vez que el contenido de agua se reduce por debajo del 10% en peso. Sin embargo, con el fin de preservar el sabor y valor nutritivo de los alimentos, es necesario reducir su contenido de humedad por debajo del 5% en peso (Geankoplis, 2009).

1. 1. Clasificación de los secadores solares

Los secadores solares utilizados en la agricultura para la deshidratación de alimentos son dispositivos muy útiles desde el punto de vista de la preservación de los alimentos, aparte de que reducen el tiempo necesario de secado mejoran la calidad del producto y la efectividad del proceso protegiendo al medio ambiente (Prakash y Kumar, 2017). Cuando las fuentes de calor están diversificadas, es decir, a partir de las diferentes técnicas de calentamiento existentes hoy día, éstas se utilizan para complementar los sistemas de deshidratación artificial y por este hecho son capaces de reducir la cantidad de energía de combustibles fósiles (VijayaVenkataRaman *et al.*, 2012).

Uno de los secadores más conocidos es el secador por convección natural (pasivo), donde el aire es calentado y circula naturalmente por la fuerza de flotación debido al cambio de densidad del aire. En la figura 1 se ilustra un secador solar típico por convección natural que consiste en un calentador solar para calentamiento de aire, una cámara de secado y una chimenea. El secado pasivo de productos es una práctica común en muchas regiones tropicales y países desarrollados, en específico en pequeñas granjas de agricultura. Es usual que este tipo de secadores sean económicos y se construyan con materiales disponibles localmente, aunado a que son independientes de la red eléctrica (Ekechukwu y Norton, 1999).

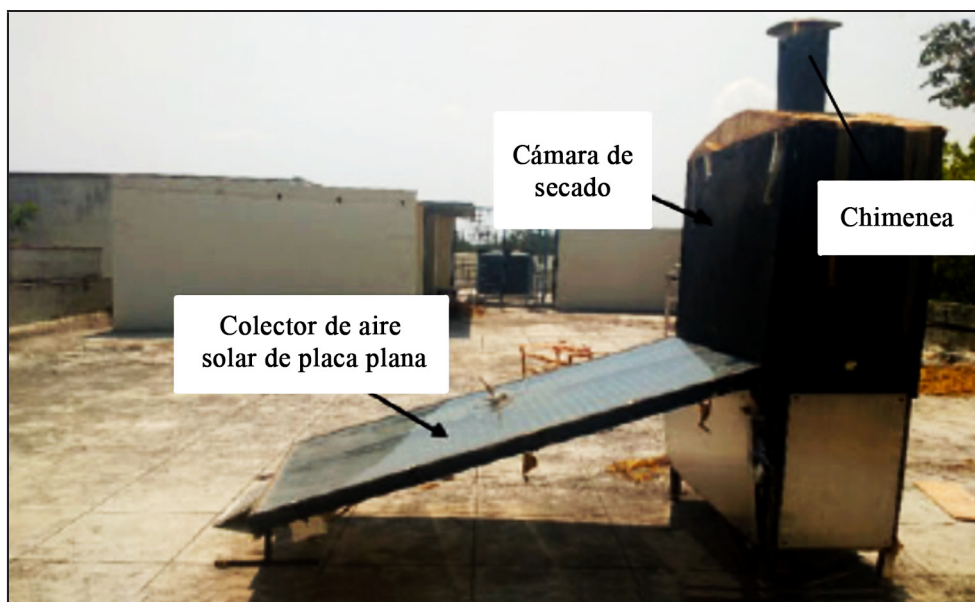


FIGURA 1

Secador solar por convección natural

Fuente: imagen tomada y mejorada de Lingayat *et al.*, 2020.

Otro secador solar típico es el de convección forzada (activo) (figura 2), el cual depende de la energía solar como fuente de calor primaria y emplea ventiladores para asegurar la circulación del aire en la cámara de secado. Al respecto, un ventilador mejora el flujo del aire y proporciona una velocidad de secado más alta en comparación con el secado logrado en un secador por convección natural. Este flujo de aire puede ser suministrado mediante

un ventilador eléctrico y operado, incluso, por un módulo fotovoltaico independiente de la red eléctrica, ya que su consumo de energía eléctrica es muy bajo (Banout *et al.*, 2011).



FIGURA 2

Secador solar por convección forzada

Fuente: El-Sebaïi y Shalaby (2013).

Además de los secadores descritos, también se cuenta con los sistemas de secado de tipo híbrido, es decir, aquellos que utilizan diversas formas de energía, como el empleo de la energía solar con la adición de sistemas de calentamiento eléctrico o basados en combustibles fósiles, incluyendo ventiladores para garantizar la circulación del aire. Es común que los secadores híbridos operen bajo la modalidad de convección forzada. Si está lo suficientemente caliente, el aire de secado calentado por energía solar es usado de forma directa para el proceso; de lo contrario, el aire es calentado usando combustibles fósiles, por ejemplo gas LP para alcanzar los valores requeridos de temperatura de secado, o bien durante las noches y tiempos con baja insolación. En su forma básica un secador híbrido, como el secador de la figura 3, consiste en un colector solar, cámara de secado, ventilador para garantizar la circulación del aire y fuente auxiliar de calentamiento operado usualmente por gas LP (Fudholi *et al.*, 2010).

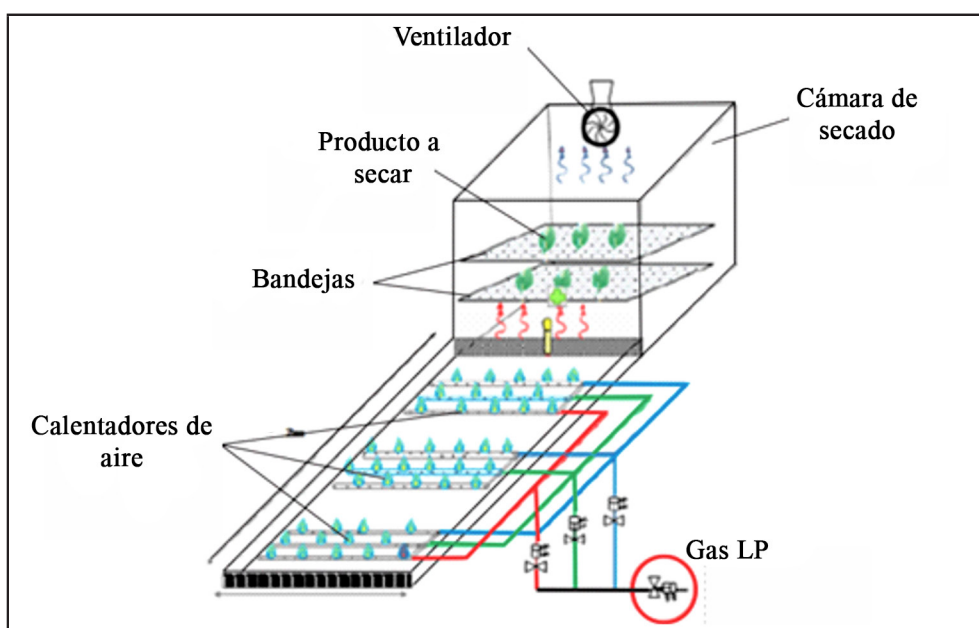


FIGURA 3

Construcción típica de un secador solar híbrido

Fuente: Imagen tomada y mejorada de Zoukit *et al.* (2016).

Dentro de los secadores híbridos, se encuentran los de tipo túnel, conformados por una cámara aislada que recibe el aire caliente para la deshidratación, como el que se ejemplifica en la figura 4. En él son ubicados los alimentos en charolas y gabinetes. Las bandejas son corredizas para transportar la mercancía y también para un manejo rápido del producto (Devan *et al.*, 2020).



FIGURA 4

Secador de tipo túnel

Fuente: planta de deshidratación INNOVACyT.

2. CINÉTICA DE SECADO

La cinética de secado se define como la serie de factores, tanto internos como externos al producto, que afectan el proceso de deshidratación. Ejemplos de factores externos son la temperatura, humedad y presión de aire atmosférico, mientras que los factores internos se asocian al material (Fontaine y Ratti 1999). La descripción de estos efectos de forma matemática puede aplicarse para calcular la cantidad de humedad evaporada, el tiempo de secado, el consumo de energía y otros valores fundamentales relacionados con el proceso. Asimismo, conociendo qué factores físicos afectan la deshidratación, es posible establecer estrategias de control automático que permitan llevar a cabo el proceso con eficiencia y respetar la calidad del producto.

3. SISTEMA DE CONTROL

De acuerdo con Coughanowr y LeBlanc (2009), los sistemas de control son usados para mantener las condiciones de un proceso a su valor deseado manipulando ciertas variables del proceso para ajustar las variables de interés. El control de cruce de un automóvil es un ejemplo de aplicación de esta técnica. La propuesta de un control de cruce es mantener la velocidad del vehículo (variable controlada) al valor deseado (Set point), a pesar de variaciones en el terreno, colinas, etc. (perturbaciones), ajustando el acelerador o el flujo de combustible al motor (variable manipulada). Otro ejemplo común es el calentador de agua doméstico. El sistema de control en el calentador de agua ayuda a mantener la temperatura en el tanque al valor deseado manipulando el flujo de combustible al quemador (para calentadores con gas) o la entrada de electricidad al calentador frente a perturbaciones, tales como la demanda variable en el calentador por las mañanas, ya que es llamado a proveer agua para las duchas diarias.

La capacidad de mantener la variable del proceso en un valor deseado, a pesar de posibles factores externos desconocidos, se conoce como *rechazo de perturbaciones*. Por su parte, a la capacidad de mover la variable de procesos de una condición de operación a una nueva, se le denomina *seguimiento del punto de ajuste*.

Conceptualmente, Coughanowr y LeBlanc (2009) establecen que un controlador compara la señal de medición de la variable controlada con la del punto de ajuste (el valor deseado de la variable controlada). La diferencia entre los dos valores se le denomina el error:

$$\text{Error} = (\text{Punto de ajuste}) - (\text{Valor medido por la señal de la variable controlada})$$

Dependiendo de la magnitud y el signo del error, el controlador toma las medidas adecuadas enviando una señal al elemento de control final que proporciona una entrada al proceso para devolver la variable controlada al punto de ajuste.

El objetivo de un sistema de control para el proceso de secado consiste en obtener una operación segura, estable y eficiente. Para esto es deseable el diseño adecuado de un controlador que proporcione las condiciones idóneas de operación. Algunas de las variables de interés para este tipo de procesos son la temperatura de aire de deshidratación y el flujo de calor. La temperatura es una de las variables críticas del proceso, ya que en gran parte de ello depende si se podrá conseguir el grado de secado especificado para el producto. Una temperatura de operación muy baja ocasionaría el proceso inverso del secado, es decir, el producto se humedecería debido a la humedad que el aire aporte. Por el contrario, una temperatura demasiado elevada alteraría la calidad del producto. Al respecto, es de gran importancia mantener la temperatura adecuada para cada producto durante todo el proceso. Por su parte, el flujo de calor es una variable que impacta directamente en el costo de operación, ya que en caso de que la energía solar no sea suficiente el aire se calentará mediante el uso de gas LP, por lo que el control adecuado de este recurso beneficiará a la operación de secado y se reducirá el costo operativo de la planta.

4. METODOLOGÍA

Tal como se ha descrito, una expresión matemática que describa la cinética de secado es esencial para predecir el tiempo que cada producto requiere para la deshidratación. Naturalmente, las cinéticas de secado están dadas dependiendo del producto. En este artículo se presentan cinéticas para el kiwi, aguacate, plátano, col rizada y chile rojo encontradas en la literatura. Con base en lo anterior y el desarrollo de modelos matemáticos para predecir el tiempo de secado, así como los perfiles de temperatura y contenido de humedad, se propone el diseño de una nueva técnica de control para regular la temperatura del producto dentro del túnel de deshidratación.

4. 1. Cinéticas de secado para frutas tropicales

De acuerdo con Ceylan *et al.* (2007), las cinéticas de secado para el kiwi, aguacate y plátano basado en el modelo de deshidratación de Lewis (Newton) se presentan en las siguientes expresiones matemáticas de acuerdo con el cuadro 1. Aquí T_A y V representan la temperatura y velocidad del aire de secado respectivamente.

CUADRO 1
Cinéticas de secado

Producto	Cinética	Rango de validez
Kiwi	$k = -2.97128 + 0.0356V + 0.0740T_A$	V : 0.03 a 0.39 m/s T_A : 39.8 a 40.2 °C
Aguacate	$k = 4.62500 - 0.01758V - 0.11532T_A$	
Plátano	$k = 2.58116 - 0.00381V - 0.06437T_A$	

Fuente: Ceylan *et al.*, 2007.

Por su parte, Mwithiga y Ochieng Olwal (2005) determinaron la cinética de secado para la col rizada. A diferencia de las otras cinéticas mostradas, se trata de una cinética de tipo Arrhenius, la cual muestra un rango de validez que va desde los 30 a 60°C y con una velocidad de aire de secado de 1 m/s, siendo la cinética estrictamente para el modelo de Lewis (Newton), que se expresa como:

$$k = \exp(9.8446 - \frac{44000.6}{T_{abs}})$$

donde la temperatura T_{abs} está representada en grados Kelvin.

Así también, Kaleemullah y Kailappan (2006) desarrollaron una cinética de secado para el chile rojo, la cual tiene rango de validez de temperatura T que va de los 50 a 65 °C. Se tiene por cinética para el modelo de Lewis (Newton) la siguiente expresión.

$$k = 0.012T - 0.4579$$

En la literatura se ha reportado el uso de diversas técnicas para el control de la temperatura de secado; la más común para la regulación del proceso es el control PID. De acuerdo con lo presentado por Ceylan *et al.* (2007), este control ha sido empleado de manera satisfactoria en secadores por convección forzada para la deshidratación de frutas tropicales como el kiwi, aguacate y plátano.

La baja irradiancia solar, la pérdida de calor debido a corrientes de aire desde el exterior, un aislamiento deficiente entre el interior y exterior del secador, entre otros disturbios internos y externos al proceso, son perturbaciones presentes en un secador solar. En ese sentido, surge la necesidad del diseño de controladores que permitan compensar todos estos factores negativos y como consecuencia comprometen la calidad del producto, el tiempo de proceso y el costo del producto.

5. RECHAZO ACTIVO DE PERTURBACIONES (ADRC) PARA EL PROCESO DE SECADO

Para propósitos de difusión, en este artículo se describe de forma general el diseño de una novedosa técnica para regulación de la temperatura para el proceso de deshidratación. La técnica se basa en el paradigma del rechazo activo de perturbaciones (ADRC). Sun *et al.* (2021) muestran el desempeño de este controlador para centrales eléctricas, cuyos resultados son satisfactorios para el proceso.

Diferente a otras contribuciones, en la técnica que se propone no se requiere la estimación en tiempo real de las perturbaciones dinámicas. A grandes rasgos, esta técnica permite compensar diversas perturbaciones desconocidas, incluyendo errores en el modelado o efectos dinámicos desconocidos que no fueron considerados en la descripción matemática del proceso usada en el diseño de control.

Por ejemplo, con fines ilustrativos, suponemos que $\varphi(t)$ es una expresión matemática que considera las posibles perturbaciones externas, así como otros términos o dinámicas no modeladas del proceso, dentro de un cierto intervalo muy pequeño de tiempo, la cual se representa de la siguiente manera:

$$\varphi(t) = a_0 + a_1(t - t_0) \text{ en el intervalo } [t_0, t_0 + \varepsilon]$$

Por lo tanto, para las dinámicas descritas con tales características, se propone el siguiente controlador para compensar las perturbaciones $\varphi(t)$ que afectan el proceso:

$$u = -\alpha_2(y - \bar{y}) - \alpha_1 \int_0^{\tau_1} (y - \bar{y}) dt - \alpha_0 \int_0^t \int_0^{\tau_1} (y(\tau_1) - \bar{y}) d\tau_1 \tau_2$$

donde y denota la variable de salida medible y $\bar{y}$ representa el valor de la temperatura de operación especificada para el proceso de secado. Así, el error e de regulación se define como:

$$e = y - \bar{y}$$

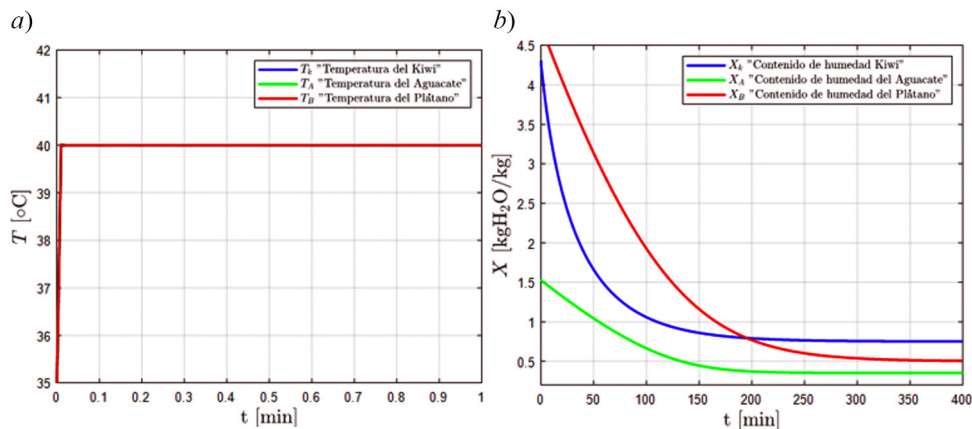
Por su parte, α_2 , α_1 y α_0 representan las ganancias del controlador, las cuales se deben seleccionar de tal manera que la dinámica del sistema en lazo cerrado sea asintóticamente estable, es decir, cuando el error se aproxime a 0. Matemáticamente esto se expresa como:

$$\lim_{t \rightarrow 0} e = 0 \quad \lim_{t \rightarrow \infty} y = \bar{y}$$

De este modo, utilizando el modelo matemático propuesto por Zdzisław Pakowski y Arun S. Mujumdar (2006) e implementando el controlador descrito, se muestran simulaciones para regular la temperatura del proceso de secado manipulando así el flujo de calor. El modelo de control propuesto se evaluó mediante las cinéticas de los productos mencionados.

6. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

Se utilizaron las siguientes condiciones iniciales de contenido de humedad para el kiwi, aguacate y plátano: 4.31 kg agua/kg, 1.51 kg agua/kg y 4.71 kg agua/kg respectivamente. Estos productos se procesaron hasta obtener un contenido humedad en base seca de 0.75 kg agua/kg, 0.35 kg agua/kg y 0.5 kg agua/kg respectivamente. La simulación del proceso de secado para estos productos se llevó a cabo con un controlador por rechazo activo de perturbaciones (ADRC) ajustando la operación desde 35 hasta 40 °C y manipulando el flujo de calor que se necesita suministrar al aire de secado para conseguir la deshidratación adecuada para cada producto.



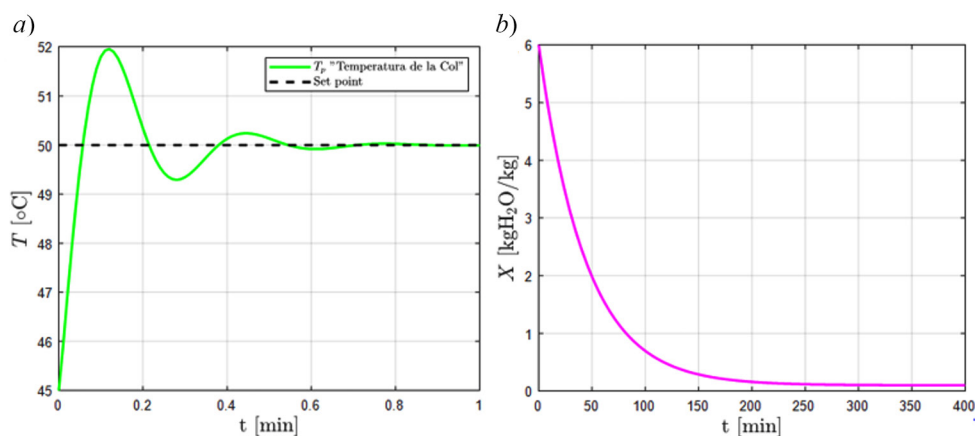
GRÁFICA 1

a) Perfil de temperatura para el kiwi, aguacate y plátano, b) Perfil del contenido de humedad

Fuente: elaboración propia.

La gráfica 1 muestra resultados de las simulaciones realizadas en MATLAB 2022b. De acuerdo con la gráfica 1a, la temperatura de referencia (40 °C) para los tres productos examinados se alcanza de manera inmediata. En cuanto a la variación del contenido de humedad, en la gráfica 1b se aprecia que para el kiwi se consigue la humedad de equilibrio en aproximadamente 200 min o 3.5 h. Para el caso del aguacate, la humedad llega a su estado de equilibrio en alrededor de 150 min, es decir 2.5 h. Por su parte, para el plátano se consigue que su contenido de humedad alcance el equilibrio en aproximadamente 270 min o 4.5 h.

De la misma forma, en las gráficas 2 y 3 se muestran simulaciones correspondientes para el control de la temperatura para el caso de la col rizada (gráfica 2a) y el chile rojo (gráfica 3a), los cuales al inicio del proceso presentaban contenidos de humedad de 6 kg agua/kg (gráfica 2b) y 4 kg agua/kg (gráfica 3b), siendo procesadas hasta alcanzar una humedad de alrededor 0.1 kg agua/kg para ambos casos.



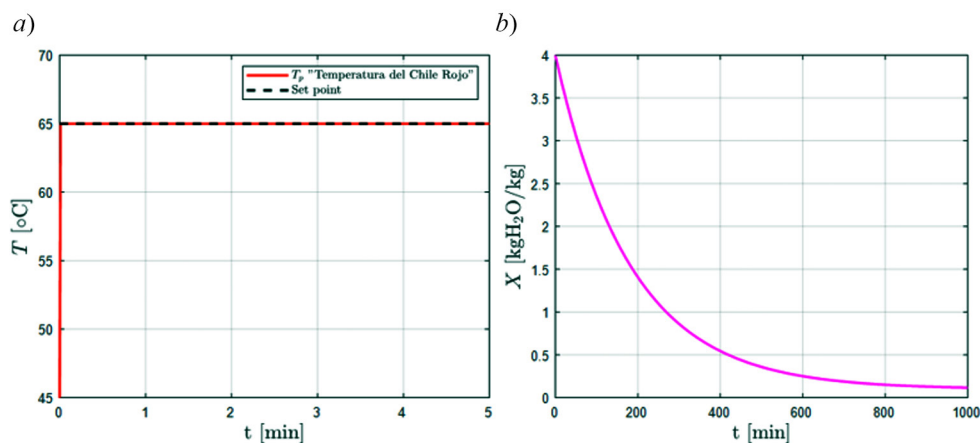
GRÁFICA 2

a) Perfil de temperaturas para la col rizada, b) Perfil del contenido de humedad

Fuente: elaboración propia.

Tal como se muestra en la gráfica 2a, para el caso de la col rizada, la simulación del proceso muestra el ajuste de la temperatura de referencia de 45 a 50°C que, a diferencia de los casos anteriores, este ajuste se consigue en aproximadamente 1 min, lo cual podría atribuirse a las propiedades físicas de la col, incluidas en su cinética de secado. El contenido de humedad de equilibrio para este producto se alcanzó en 200 min o 3.5 h.

Por último, para el chile rojo, la simulación del proceso en lazo cerrado mostrado en la gráfica 3a ilustra el ajuste de la temperatura de referencia de 45 a 65°C ; en este caso, la temperatura deseada se obtiene durante los primeros instantes del proceso. El contenido de humedad para el chile rojo alcanza el equilibrio en 900 min, es decir, 15 h; el chile rojo fue el producto que requirió más tiempo para su secado. En aplicaciones prácticas resulta complicado contar con luz solar durante 15 h de manera continua, por lo que en estas circunstancias es deseable tener el soporte de fuentes de energía convencionales, tal como el gas LP. De esta forma, la operación de la planta será continua y el proceso no se verá interrumpido hasta el siguiente día para terminar la deshidratación del mismo lote de producto.,



GRÁFICA 3

a) Perfil de temperatura del chile rojo, b) Perfil del contenido de humedad

Fuente: elaboración propia.

Es importante considerar que si el proceso opera por debajo de la temperatura especificada, el tiempo de secado se extiende, lo que representa un retraso en la operación de la planta al arriesgar las características físicas, químicas y nutricionales que el producto requiere; por tanto, se ve comprometida la distribución y venta del producto. En consecuencia, la implementación de sistemas de control para el proceso de calentamiento en el secado es fundamental para que la planta continúe trabajando de manera eficiente y sin demoras en el proceso.

PROSPECTIVA

La técnica de control por rechazo activo de perturbaciones permite la regulación de la temperatura del proceso de secado de forma satisfactoria, ya que concede una mejor operación de la planta porque genera un incremento en la productividad, seguridad en la operación del proceso, así como el total aprovechamiento de la materia prima. Asimismo, se evita el desperdicio de producto al garantizar las condiciones de operación, ya que si la planta opera por debajo de la temperatura deseada no solo incrementaría el tiempo necesario para la deshidratación, sino que corre el riesgo de descomponerse. En consecuencia, se procede a retirar y desechar el lote de producto, lo que ocasiona pérdidas de materia prima y tiempo de trabajo. Considerando las grandes ventajas que proporcionan los sistemas de control, es deseable implementar estas tecnologías para todo tipo de procesos que requieran precisión y seguridad, pues facilitan las actividades que los trabajadores realizarían sin este tipo de tecnologías.

CONCLUSIONES

La técnica de control por rechazo activo de perturbaciones representa una buena alternativa para regular la temperatura al punto de operación deseado. A diferencia de otros esquemas de control en el estado del arte, la técnica de control propuesta no requiere de la estimación en tiempo real de las perturbaciones. Asimismo, esta nueva técnica de control para deshidratación de productos agroindustriales permite alcanzar el punto de operación de referencia de manera satisfactoria durante los primeros segundos del proceso. Las variaciones en la dinámica de cada producto se observan en su perfil de contenido de humedad debido a que la pérdida de agua depende en gran medida de la cinética de secado de cada producto y las condiciones de operación. Además, la técnica de control por rechazo activo de perturbaciones utilizada no considera información detallada del modelo matemático no lineal de la dinámica del proceso. De este modo, las perturbaciones dinámicas se deben compensar o suprimir mediante la adición de términos de error integral en la variable de control auxiliar y así regular la temperatura de secado a la condición de operación especificada. De este modo, el esquema de control propuesto garantiza la regulación de la temperatura del aire de secado a las condiciones idóneas de operación, ya que proporciona un suministro en el flujo de calor moderado, lo que beneficiará en la reducción del consumo energético del proceso de deshidratación. La técnica de control se aplicó para el secado del kiwi, aguacate, plátano, col rizada y chile rojo. Los resultados confirmaron el desempeño dinámico eficaz del esquema de control. En futuros trabajos se abordarán más casos de estudio para la deshidratación eficiente de otros productos alimenticios de la canasta básica de la población mexicana mediante la técnica de control por rechazo activo de perturbaciones.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los árbitros asignados y al editor por su revisión profesional, comentarios y recomendaciones para mejorar la calidad del artículo. Asimismo, extendemos los agradecimientos al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo otorgado para el desarrollo de este trabajo.

REFERENCIAS

- Banout, J., Ehl, P., Havlik, J., Lojka, B., Polesny, Z., & Verner, V. (2011). Design and performance evaluation of a Double-pass solar drier for drying of red chilli (*Capsicum annum* L.). *Solar Energy*, 85(3), 506-515.
- Belessiotis, V., & Delyannis, E. (2011). Solar drying. *Solar energy*, 85(8), 1665-1691.
- Ceylan, İ., Aktaş, M., & Doğan, H. (2007). Mathematical modeling of drying characteristics of tropical fruits. *Applied Thermal Engineering*, 27(11-12), 1931-1936.
- Coughanowr, D., & LeBlanc, S. E. (2009). *Process systems analysis and control*. McGraw-Hill's Chemical Engineering Series.
- Daş, M., Alıç, E., & Akpınar, E. K. (2021). Numerical and experimental analysis of heat and mass transfer in the drying process of the solar drying system. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 24(1), 236-246.
- Devan, P. K., Bibin, C., Shabrin, I. A., Gokulnath, R., & Karthick, D. (2020). Solar drying of fruits—A comprehensive review. *Materials Today: Proceedings*, 33, 253-260.
- Doymaz, İ. (2005). Drying characteristics and kinetics of okra. *Journal of Food Engineering*, 69(3), 275-279.
- Doymaz, I., & Pala, M. (2002). The effects of dipping pretreatments on air-drying rates of the seedless grapes. *Journal of Food Engineering*, 52(4), 413-417.
- El-Sebaei, A. A., & Shalaby, S. M. (2013). Experimental investigation of an indirect-mode forced convection solar dryer for drying thymus and mint. *Energy Conversion and Management*, 74, 109-116.
- Ekechukwu, O. V., & Norton, B. (1999). Review of solar-energy drying systems III: low temperature air-heating solar collectors for crop drying applications. *Energy Conversion and Management*, 40(6), 657-667.
- Fontaine, J., & Ratti, C. (1999). Lumped-parameter approach for prediction of drying kinetics in foods. *Journal of Food Process Engineering*, 22(4), 287-305.
- Fudholi, A., Sopian, K., Ruslan, M. H., Alghoul, M. A., & Sulaiman, M. Y. (2010). Review of solar dryers for agricultural and marine products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 1-30.
- Geankoplis, C. J. (2009). *Procesos de transporte y principios de procesos de separación* (3a ed.). (pp. 773-783) CECSA.
- Kaleemullah, S., & Kailappan, R. (2006). Modelling of thin-layer drying kinetics of red chillies. *Journal of Food Engineering*, 76(4), 531-537.
- Lingayat, A., Chandramohan, V. P., & Raju, V. R. K. (2020). Energy and exergy analysis on drying of banana using indirect type natural convection solar dryer. *Heat Transfer Engineering*, 41(6-7), 551-561.
- Mohammed, S., Fatumah, N., & Shadia, N. (2020). Drying performance and economic analysis of novel hybrid passive-mode and active-mode solar dryers for drying fruits in East Africa. *Journal of Stored Products Research*, 88, 101634.
- Mohana, Y., Mohanapriya, R., Anukiruthika, T., Yoha, K. S., Moses, J. A., & Anandharamakrishnan, C. (2020). Solar dryers for food applications: Concepts, designs, and recent advances. *Solar Energy*, 208, 321-344.
- Mwithiga, G., & Olwal, J. O. (2005). The drying kinetics of kale (*Brassica oleracea*) in a convective hot air dryer. *Journal of Food Engineering*, 71(4), 373-378.
- Pakowski, Z., & Mujumdar, A. S. (2006). Basic process calculations and simulations in drying. *Handbook of Industrial Drying*, 53.

- Porciello, G. P., & Doerr, D. (1999, April). Advanced process control for moisture monitoring and control applications. In *IEEE Industry Applications Society Advanced Process Control Applications for Industry Workshop* (pp. 58-64). IEEE.
- Prakash, O., & Kumar, A. (Eds.). (2017). *Solar drying technology: concept, design, testing, modeling, economics, and environment*. Springer.
- Ruangurai, P., Silawatchananai, C., & Howimanporn, S. (2020). PSO based Fictitious Reference Iterative Tuning of air dryer for fruit drying process. In *2020 9th International Congress on Advanced Applied Informatics (IIAI-AAI)* (pp. 548-551). IEEE.
- Sun, L., Xue, W., Li, D., Zhu, H., & Su, Z. G. (2021). Quantitative tuning of active disturbance rejection controller for FOPTD model with application to power plant control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 69(1), 805-815.
- VijayaVenkataRaman, S., Iniyan, S., & Goic, R. (2012). A review of solar drying technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 2652-2670.
- Zoukit, A., El Ferouali, H., Salhi, I., Doubabi, S., Abdenouri, N., & El Kilali, T. (2016, October). Control of a solar dryer using a hybrid solar gas collector. In *2016 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM)* (pp. 1-6). IEEE.

CC BY-NC-ND