

# **OPTIMIZACIÓN DE CONTROL DE UN SECADOR ROTATORIO PARA PRODUCTOS AGROINDUSTRIALES**

## *CONTROL OPTIMIZATION OF A ROTARY DRYER FOR AGRO-INDUSTRIAL PRODUCTS*

***Luis Alberto Astudillo Escobar***

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México  
*m1903119@itcelaya.edu.mx*

***Micael Gerardo Bravo Sánchez***

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México  
*gerardo.bravo@itcelaya.edu.mx*

***Juan José Martínez Nolasco***

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México  
*juan.martinez@itcelaya.edu.mx*

***Adriana Guzmán López***

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México  
*adriana.guzman@itcelaya.edu.mx*

**Recepción:** 26/octubre/2020

**Aceptación:** 27/noviembre/2020

### **Resumen**

Este proyecto de tesis tiene como objetivo la optimización de control de un secador rotatorio de productos agroindustriales. El diseño del control integra instrumentación en un secador rotatorio, diseño de sistema de supervisión través del software LabVIEW V15.0, adquisición de datos que se realiza con una tarjeta NI USB-6009. La interfaz de operación permite controlar el grado de temperatura de aire del secador con técnicas de control P, PI, se programan dos modalidades de operación, offline y online, el modo online muestra el comportamiento del proceso y cinéticas de secado de cascara de naranja del prototipo experimental. El modo offline realiza una predicción de tiempo de secado, porcentaje de humedad final y peso, esto aplicando técnicas de PAGE, WEIBULL Y GAB, modelos ampliamente utilizados y comprobados en el secado de materiales orgánicos para la generación de cinéticas de secado. La discusión se centra en la aplicación de la optimización de un secador de productos agroindustriales a través de la instrumentación y

aplicación de técnicas de control para mejorar el consumo energético, bases que servirán de análisis para la mejora de secadores rotatorios de alimentos agroindustriales en el futuro.

**Palabras Clave:** Cinéticas, controladores, instrumentación, modelos y secado.

## **Abstract**

*This thesis project aims to optimize the control of a rotary dryer for agro-industrial products. The control design integrates instrumentation in a rotary dryer, supervision system design through LabVIEW V15.0 software, data acquisition performed with a NI USB-6009 card. The operating interface allows controlling the degree of air temperature of the dryer with P, PI control techniques, two modes of operation are programmed, offline and online, the online mode shows the behavior of the process and the kinetics of the orange peel drying process. experimental prototype. The offline mode makes a prediction of drying time, percentage of final moisture and weight, this applying PAGE, WEIBULL and GAB techniques, widely used and proven models in the drying of organic materials for the generation of drying kinetics. The discussion focuses on the application of the optimization of a dryer for agro-industrial products through the instrumentation and application of control techniques to improve energy consumption, bases that will serve as analysis for the improvement of rotary dryers for agro-industrial food in the future.*

**Keywords:** Kinetics, controllers, instrumentation, models and drying.

## **1. Introducción**

La industria alimenticia es una de las industrias más estables y con un crecimiento continuo. En el rubro alimenticio el procesamiento industrial de las materias aumenta la vida de anaquel de los alimentos, facilita el empaque, manipulación y transporte. Uno de los atributos más destacados del procesamiento industrial de alimentos es que permite la modificación de características manteniendo su palatabilidad, lo que favorece su aceptación y volúmenes de venta [Allen, 1992]. Un producto con alto valor agregado son los alimentos deshidratados, los productos que demandan los consumidores son variados, frutas, granos,

verduras, carnes, y pescados, este producto genera un gran mercado con un margen de ganancia óptimo. En esencia base una operación de secado consiste en extraer parte de la humedad contenida en un alimento, es decir se reduce su peso al extraer el agua de la materia orgánica. El secado de alimentos ha evolucionado, los métodos habituales incluyen secado por atomización, secado rápido, secado en tambor, secado en bandeja entre otros. En la industria del secado hay diversos tipos de secadores, Savaresi describe una aplicación para un secador rotatorio de azúcar [Savaresi, 2001]. Otros equipos de secado presentan un modelo aplicado a residuos vegetales [Iguaz, 2003], Otra investigación presenta modelado con simulación para identificar mejoras en el proceso [Baxi, 2015]. Helge modela un secador rotatorio aplicando un control basado en modelos no lineales [Didriksen, 2002]. Los secadores rotatorios son equipos que se utilizan para la obtención de pastas, polvos, y dependiendo del proceso pueden ser utilizados para la obtención de materias como lo son secado de semillas o secado de cascara de frutos cítricos. En la literatura existen abundantes publicaciones que abordan el secado de alimentos donde las investigaciones se enfocan en las cinéticas de secado de un producto, modelado del proceso de secado y reducción de tiempo de secado en función de la temperatura, pocas publicaciones abordan temas relacionados con la aplicación de técnicas de control para la mejora del proceso, consumo energético y capacidad de secado en un secador rotatorio de alimentos agroindustriales. Esta investigación utilizara tres modelos de cinéticas de pérdida de agua que han sido ampliamente utilizados en diversas investigaciones de secado de cítricos WIEBULL, GAB y PAGE.

Los modelos matemáticos alimentaran un prototipo virtual simulando un secador rotatorio de alimentos construido en la plataforma de programación grafica LabVIEW, también se aplican técnicas de control clásico P y PI para controlar la temperatura de secado suministrada a través de una fuente de energía convencional. El secador virtual nos permite simular el proceso de secado de cascara de naranja, con el objetivo de estimar consumo energético del equipo, tiempo de secado y terminación del producto. Los datos colectados del simulador serán comparados con un equipo experimental para validar su confiabilidad.

## **2. Métodos**

La metodología aplicada para la optimización del secador consta de seis etapas:

- Instrumentación del secador. Esta etapa comprende la instalación de sensores para el monitoreo de la temperatura, corriente consumida, cantidad de humedad y flujo de aire a la salida. La instrumentación permite al equipo ser monitoreado con elementos que comunican en tiempo real las condiciones de proceso del equipo. Tomando en cuenta que las señales recibidas a través de la tarjeta de adquisición son de 0-10 volts en los puertos analógicos, la implementación de estos conlleva a la construcción de acopladores para monitoreo con la tarjeta de adquisición de datos USB NI 6008 de National Instruments.
- La segunda etapa Implementa un instrumento virtual permite configurar y parametrizar el proceso, así como controlar parámetros como la temperatura de manera autónoma. La interfaz virtual construida en LabVIEW 2015 versión 15.0, realiza una simulación del proceso y una comparativa en tiempo real. La interfaz programada permite accionar el equipo, controlar el proceso, monitoreando variables de interés, temperatura, tiempo de secado, velocidad de rotación, velocidad del aire.
- La tercera etapa de la metodología incluye la aplicación de técnicas de control P y PI a la variable de temperatura con este sistema integrado de lazo cerrado se estima una reducción de consumo energético además de mantener la condición de secado con una mayor estabilidad, los controladores aplicados permiten una variación para mejorar la estabilidad por perturbaciones en el cambio de la temperatura.
- La etapa cuatro integra en el instrumento virtual un simulador de secado que estima tiempo de ciclo, cantidad de humedad y peso final del producto, así como el consumo energético total del proceso de manera offline, la aplicación de tres métodos GAB, PAGE Y WEIBULL, para la generación de cinéticas de permitirá definir cual se ajusta mejor al proceso experimental de secado de cascará de naranja, el instrumento se convierte en un prototipo virtual que sirve de plataforma de entrenamiento. El instrumento virtual tiene la capacidad de

seguir las condiciones del proceso experimental en modo online, con ello realizar una comparativa entre los datos estimados y los datos reales, generando un registro del comportamiento.

- La última etapa de la metodología realiza una evaluación y comparativa entre métodos aplicados, los valores obtenidos se discuten para determinar un ajuste de parámetros y técnicas aplicadas. La metodología aplicada al proyecto se muestra en la figura 1.

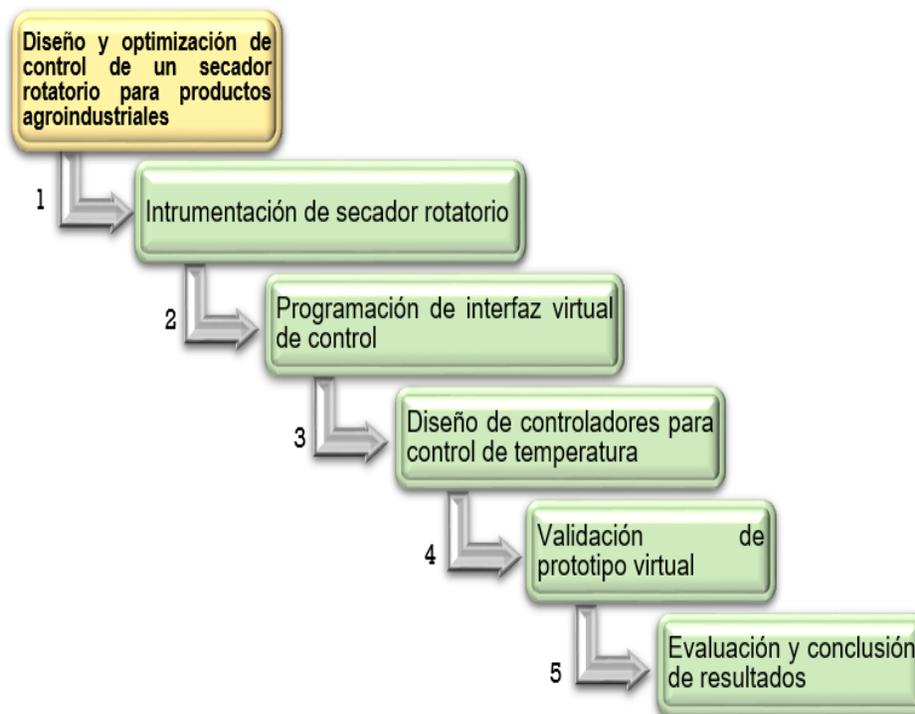


Figura 1 Metodología del proyecto.

El proyecto utiliza un secador de tambor rotatorio con paletas, equipo de secado de tamaño a escala para pruebas experimentales, el producto seleccionado para el secado es cascara de naranja, producto abundante en la región, obtenido de comercios de servicio de alimentos, restaurantes o puestos ambulantes que tienen como producto de venta jugo de naranja. La cascara de naranja pasa por un proceso de preparación para su uso, selección, separación y lavado. El equipo para instrumentación y corridas de secado es un secador de tambor rotatorio, el prototipo en fase de construcción se muestra en la figura 2.



Figura 2 Secador rotatorio (prototipo).

Los elementos que componen el proceso son los siguientes:

- Absorción de aire del ambiente, en esta etapa se adquiere aire del medio ambiente mediante un ducto conectado al tambor rotatorio.
- Calentamiento del aire a través de un túnel, calor generado por una fuente convencional, en esta etapa el aire adsorbido se calienta con una resistencia eléctrica.
- Paso del aire a través del tambor rotatorio, en esta etapa se realiza el secado del producto, un tambor rotatorio hace girar el material agroindustrial para realizar un secado homogéneo, el aire caliente extrae la humedad del producto.
- Extracción de aire, la última etapa del proceso incluye un extractor que permite mover el aire caliente que se encuentra en el interior del tambor y llevarlo al exterior. El proceso de secado se muestra en la figura 3.

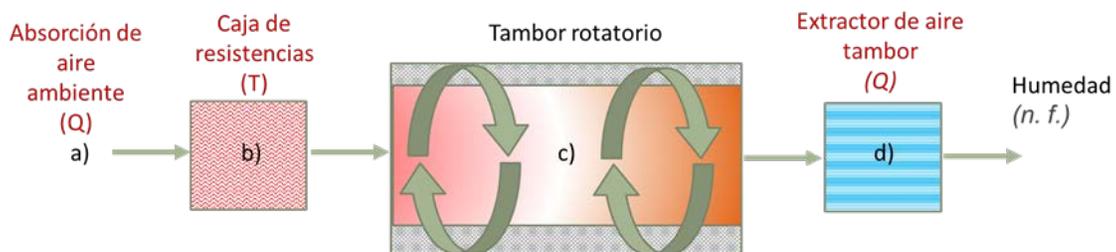


Figura 3 Esquemático variables de entrada y salida proceso de secado.

## Modelado del proceso de secado

Los modelos propuestos han sido ampliamente utilizados en la literatura para la descripción de las cinéticas de pérdida de humedad [Rosa, 20015]. La cinética de secado es utilizada para representar la pérdida de humedad y su relación con las variables de proceso, Daniel Maisnam en su publicación “Recent advances in conventional drying of foods” analiza la importancia de la selección del método para la representación del proceso de pérdida de humedad en productos agrícolas [Maisnam, 2017]. Se han seleccionado tres modelos de estudio para la generación de las cinéticas de secado de cascara de naranja, los modelos seleccionados han sido ampliamente utilizados para la generación de cinéticas de secado de cascara de cítricos. Los modelos se muestran en la tabla 1.

Tabla 1 Modelos para trazas de cinéticas de secado.

Nombre	Modelo
Modelo WEIBULL	$MR = \exp \left[ - \left( \frac{t}{\alpha} \right)^\beta \right]$
Modelo GAB	$MR = \frac{W_m C_g K_g a_w}{(1 - K_g a_w)[1 + (C_g - 1)K_g a_w]}$
Modelo PAGE	$MR = \exp(-K t^n)$

### Modelo WEIBULL

La función de distribución de WEIBULL desarrollada en 1939 por W. Weibull [Cunha, 1998]. Es un modelo estadístico aplicado a la tecnología de alimentos que representa la probabilidad de fallo, la deshidratación de un alimento puede considerarse como fallo bajo condiciones determinadas. Diversas investigaciones usan el modelo Weibull para describir el cambio de humedad de materiales alimenticios en diferentes condiciones de secado [Wang, 2017]. el modelo de Weibull es representado por la ecuación 1.

$$MR = \exp \left[ - \left( \frac{t}{\alpha} \right)^\beta \right] \quad (1)$$

Donde:

$\alpha$ : Es el parámetro de forma y se asimila a un índice de comportamiento del producto durante el secado. A medida que aumenta su valor, disminuye la

velocidad inicial del proceso de secado. Si es superior a 1 predice tiempos muertos del proceso y si es igual a la unidad, el modelo presenta una cinética de primer orden.

$\beta$ : Está relacionado con la cinética del proceso, presentando una relación inversa con la velocidad de este. El parámetro  $\beta$  engloba el efecto en la cinética de variables como temperatura, velocidad del aire y tamaño de partícula [Pérez, 2007].

### Modelo GAB

La isoterma de adsorción de Guggenheim, Anderson y de Boer (GAB), ha sido ampliamente utilizada para el secado de alimentos [Timmermann, 2001]. Su aplicación se deriva de 3 parámetros;  $W_m$  contenido de agua en la monocapa,  $a_w$  actividad del agua,  $C_g$  y  $K_g$  son constantes del GAB. Diversas investigaciones como la de Bello M. en su artículo Modelado de la adsorción de humedad para Hongos revela que la expresión ajusta de manera exitosa y define la pérdida de humedad de un producto [Bello, 2019], el modelo GAB se muestra en la ecuación 2.

$$MR = \frac{W_m C_g K_g a_w}{(1 - K_g a_w)[1 + (C_g - 1)K_g a_w]} \quad (2)$$

Donde:

$W_m$ : contenido de humedad monocapa, kg agua / kg dm.

$a_w$ : actividad del agua.

$C_g$ : constante de Guggenheim.

$K_g$ : constante en el modelo GAB.

Este modelo ha sido aplicado con un alto margen de ajuste de secado de cascara de cítricos [Garau, 2006]. Las aplicaciones del modelo de GAB, se extendió ampliamente gracias a las rutinas computarizadas de resolución de cuadrados mínimos, la determinación es posible ya sea por regresión no lineal partiendo de la expresión directa de la isoterma GAB.

## **Modelo PAGE**

El modelo de PAGE fue planteado inicialmente por Lewis [Lewis, 1921], este modelo probado en diversas isotermas de secado, como lo son la evaluación de técnicas de hidrosecado [Casso, 2016], obteniendo excelentes resultados, como secado de pasta de tuna [Abraham, 2019], secado de ajo [Madamba 1996] y secado de rodajas de manzana [Orrego, 2014]. La expresión matemática está dada por la ecuación 3.

$$MR = \exp(-Kt) \quad (3)$$

Posteriormente la expresión fue modificada por PAGE quien sugirió una modificación del modelo exponencial, agregando un exponente  $n$  como se muestra en la ecuación 4.

$$MR = \exp(-Kt^n) \quad (4)$$

Donde:

$K$ : es la constante de velocidad de secado.

$n$ : es la constante de PAGE.

$t$ : es el tiempo de secado.

Este modelo ha sido utilizado para trazar cinéticas de secado en la literatura se encuentra secado de cascara de naranja [Deng, 2020].

## **3. Resultados**

### **Instrumentos virtuales**

El secador se apoya de un instrumento virtual para el control del equipo e interfaz con el usuario, construido en la plataforma de programación gráfica LabVIEW. En la figura 4. Se muestra la pestaña PROCESO, esta ventana tiene el control para dos modos de trabajo del equipo "Manual" o "Automático", el control manual permite realizar operaciones de movimiento de los elementos de manera separada para su comprobación de funcionamiento, comprobación de calentamiento de resistencia, rotación de tambor y manipulación del extractor de aire. La ventana de proceso con el modo automático muestra el tiempo de corrida, alarma de fallo, intervalo de pesado para corridas experimentales, muestra de modelo de secado seleccionado,

muestra de tipo de controlador seleccionado, muestra de peso inicial del producto, peso actual dentro de la corrida y % de peso perdido el producto. La ventana de proceso muestra los gráficos de Cinética de secado, temperatura del proceso y velocidad de extracción de aire, figura 4.



Figura 4 Panel de Proceso LabVIEW.

La ventana de PARAMETROS permite configurar las condiciones del proceso. En la sección METODO se puede seleccionar el modelo de secado esta oferta tres opciones, Weibull, Page y Gab. La sección EQUIPO permite configurar las condiciones de secado, temperatura de ciclo, velocidad de rotación del tambor y velocidad de extracción de aire. La sección CONTROL permite seleccionar el tipo de control para la temperatura y permite modificar las ganancias de los controladores, de los controles hay dos opciones Proporcional y Proporcional Integral. La sección PRODUCTO permite ingresar valores relacionados con el material, peso inicial, % de humedad del producto, tipo, tamaño de la muestra, cantidad de producto en Kg. Dentro de esta ventana es posible realizar una operación de precalentamiento del equipo en cada inicio de ciclo con un tiempo determinado. En la sección de CRITERIO DE FINALIZACION se configura el tiempo de secado en horas y el % deseado de pérdida de peso (figura 5).



Figura 5 Parámetros de Proceso LabVIEW.

## 4. Discusión

La metodología incluye la simulación de los procesos de secado a través de modelos solucionados y aplicados en diversas publicaciones que muestran resultados satisfactorios, el proyecto emplea parámetros y soluciones de los modelos que ajustan a los datos experimentales en las cinéticas de secado de cascara de naranja. Los modelos aplicados alimentan el simulador que sirve de plataforma de entrenamiento, el secador virtual representa el proceso experimental. La plataforma creada sienta las bases para desarrollo de conocimientos de los procesos de secado a través de plataformas digitales.

## 5. Bibliografía y Referencias

- [1] Allen, L., (1992) The mexican food system: traditional and modern. Ecology of food and nutrition. N° 27, pag. 219-234.
- [2] Baxi, H., Patel, A., & Barve, J. (2015, May). Modelling and simulation of dryer system. In 2015 International Conference on Industrial Instrumentation and Control (ICIC) (pp. 1544-1549). IEEE.

- [3] Savaresi, S. M., Bitmead, R. R., & Peirce, R. (2001). On modelling and control of a rotary sugar dryer. *Control engineering practice*, 9(3), 249-266, 2001.
- [4] Iguaz, A., Esnoz, A., Martínez, G., López, A., & Virseda, P. (2003). Mathematical modelling and simulation for the drying process of vegetable wholesale by-products in a rotary dryer. *Journal of food engineering*, 59(2-3), 151-160.
- [5] Didriksen, H. (2002). Model based predictive control of a rotary dryer. *Chemical Engineering Journal*, 86(1-2), 53-60.
- [6] Maisnam, D., Rasane, P., Dey, A., Kaur, S., & Sarma, C. (2017). Recent advances in conventional drying of foods. *Journal of Food Technology and Preservation*, 1(1).
- [7] Casso-Hartmann, L. M., & Ing, A. P. R. (2016). Evaluación de la Técnica de Hidrosecado En Cáscaras De Naranja (*Citrus Sinensis*)/Evaluation Of The Drying Hydro Technique On Orange Peels (*Citrus Sinensis*). *Vitae*, 23, S375.
- [8] Cunha, L. M., Oliveira, F. A., & Oliveira, J. C. (1998). Optimal experimental design for estimating the kinetic parameters of processes described by the Weibull probability distribution function.
- [9] Wang, J., Fang, X. M., Mujumdar, A. S., Qian, J. Y., Zhang, Q., Yang, X. H., ... & Xiao, H. W. (2017). Effect of high-humidity hot air impingement blanching (HHAIB) on drying and quality of red pepper (*Capsicum annuum* L.). *Food Chemistry*, 220, 145-152.
- [10] García Pérez, J. V. (2008). Contribución al estudio de la aplicación de ultrasonidos de potencia en el secado convectivo de alimentos (Doctoral dissertation).
- [11] Timmermann, E. O., Chirife, J., & Iglesias, H. A. (2001). Water sorption isotherms of foods and foodstuffs: BET or GAB parameters?. *Journal of food engineering*, 48(1), 19-31.
- [12] Bello, M., Oluwamukomi, M. O., & Enujuigha, V. N. (2019). Modeling of the adsorption isotherm of *Pleurotus ostreatus* using Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB) equation. *Journal of Engineering and Technology Research*, 11(4), 41-46.

- [13] Garau, M. C., Simal, S., Femenia, A., & Rosselló, C. (2006). Drying of orange skin: drying kinetics modelling and functional properties. *Journal of Food Engineering*, 75(2), 288-295.
- [14] Lewis, W. K. (1921). The rate of drying of solid materials. *Industrial & Engineering Chemistry*, 13(5), 427-432.
- [15] Abraham-Juarez, M. D. R., Olalde-Portugal, V., Ceron-Garcia, A., & Sosa-Morales, M. E. (2019). Hot air drying kinetics of thin layers of prickly pear fruit paste. *Sains Malaysiana*, 48(2), 361-367.
- [16] Madamba, P. S., Driscoll, R. H., & Buckle, K. A. (1996). The thin-layer drying characteristics of garlic slices. *Journal of food engineering*, 29(1), 75-97.
- [17] Orrego, C. E., Salgado, N., & Botero, C. A. (2014). Developments and trends in fruit bar production and characterization. *Critical reviews in food science and nutrition*, 54(1), 84-97.
- [18] Deng, L. Z., Mujumdar, A. S., Yang, W. X., Zhang, Q., Zheng, Z. A., Wu, M., & Xiao, H. W. (2020). Hot air impingement drying kinetics and quality attributes of orange peel. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(1), e14294.
- [19] Rosa, D. P., Cantú-Lozano, D., Luna-Solano, G., Polachini, T. C., & Telis-Romero, J. (2015). Mathematical modeling of orange seed drying kinetics. *Ciência e Agrotecnologia*, 39(3), 291-300.