

# OPTIMIZACIÓN DE LA APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE SECADO INTERMITENTE AL SECADO CONVECTIVO DE PATATA: DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA DE GESTIÓN DE LA TOMA DE DECISIONES.

J. Rodriguez<sup>1</sup>, J. Bon<sup>2</sup>

## RESUMEN

Para optimizar la aplicación de la tecnología de secado intermitente al secado convectivo de patata se desarrolló una herramienta de optimización del proceso, definida como la búsqueda de los tiempos de duración de cada periodo de calentamiento y reposo que minimizaran la ganancia entálpica del producto. Para poder cuantificar la ganancia entálpica se modelizó el proceso de secado.

El problema de optimización y la identificación de los parámetros se resolvió con el desarrollo de algoritmos computacionales COMSOL Multiphysics® 3.4 y Matlab® R2007b.

En la identificación de parámetros del modelo se empleó información experimental de la experiencias de secado continuo e intermitente que se realizaron en cilindros de patata a diferentes temperaturas de calentamiento (40, 50, y 60°C) y diferentes velocidades (1 y 2 m s<sup>-1</sup>).

A partir de los resultados se puede resaltar que en el secado intermitente el tiempo de calentamiento es menor que en el secado continuo. La aplicación de la herramienta de optimización desarrollada permitiría optimizar las condiciones de operación minimizando el tiempo de calentamiento y, por lo tanto, el consumo energético, y mejorando la calidad del producto final al disminuir su impacto térmico.

## ABSTRACT

To optimize the application of intermittent drying technology to convective drying of potato a tool for process optimization was developed. It was defined as the finding of time duration of each heating and resting times that minimize the enthalpy gain of the product. Thus, in order to quantify the enthalpic gain the drying process was modeled.

The problem of optimization and parameter identification was solved with the development of computer algorithms COMSOL Multiphysics ® 3.4 and Matlab ® R2007b.

Experimental data from the experiences of continuous drying and intermittent were used in the identification of model parameters, they were made into cylinders of potato at different heating temperatures (40, 50, and 60°C) and different velocities (1 and 2 m s<sup>-1</sup>).

From the results it can be noted that the intermittent drying heating time is less than in the continuum. Thence application of the developed optimization tool would optimize operating conditions to minimize the heating time and,

<sup>1</sup> Instituto de Ingeniería de Alimentos para el Desarrollo. Universidad Politécnica de Valencia, Camino Vera s/n 46022. Valencia. España.

<sup>2</sup> Departamento de Tecnología de los Alimentos. Universidad Politécnica de Valencia, Camino Vera s/n 46022. Valencia. España.

therefore, energy consumption, and thus improving product quality by reducing the thermal impact.

## **RESUM**

Per a optimitzar l'aplicació de la tecnologia d'assecat intermitent a l'assecat convectiu de creïlla es desenvolupà una ferramenta d'optimització del procés, definida a partir de l'anàlisi dels temps de duració de cadascun dels períodes d'escalfament i repòs que minimitzaren el guany entàlpic del producte. Per a poder quantificar aquest guany entàlpic es modelitzà el procés d'assecat.

El problema de l'optimització i la identificació dels paràmetres es va resoldre amb el desenvolupament d'algoritmes computacionals COMSOL Multiphysics® 3.4 i Matlab® R2007b.

En la identificació de paràmetres del model es va utilitzar informació experimental de les experiències d'assecat continu i intermitent les quals es realitzaren en cilindres de creïlla a diferents temperatures d'escalfament (40, 50, y 60°C) i diferents velocitats (1 i 2 m s<sup>-1</sup>).

A partir dels resultats es pot deduir que amb l'assecat intermitent el temps d'escalfament és menor que en el continu. L'aplicació de la ferramenta d'optimització desenvolupada permetria optimitzar les condicions.

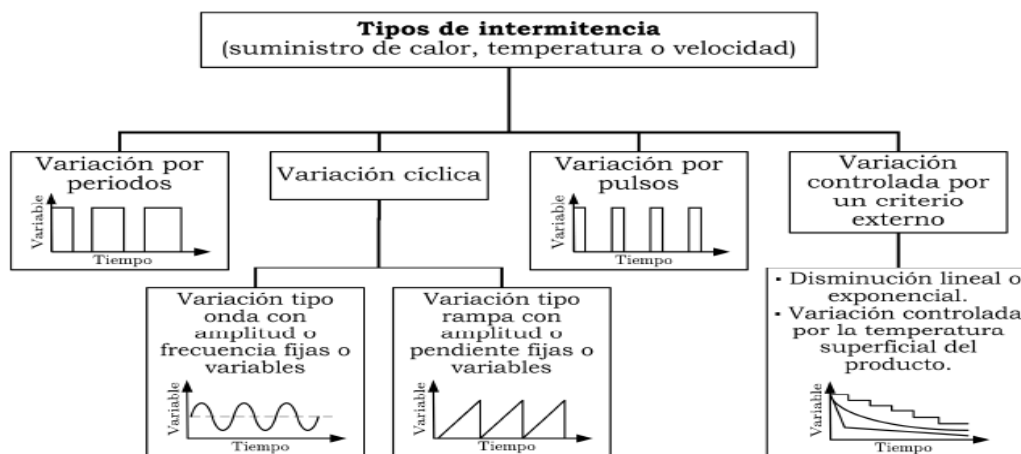
**Palabras claves:** secado intermitente, modelo matemático, simulación, optimización.

## INTRODUCCION

El secado por aire caliente es uno de los procesos de conservación más antiguos, comunes y diversos, ocupando un importante lugar en la transformación de productos agroalimentarios y en los sistemas de tratamiento poscosecha. Es también una de las actividades industriales que generan mayor consumo energético (Strumillo et al., 2006), y, por ende, un impacto ambiental considerable, al mismo tiempo que influye sobre importantes parámetros de aceptación comercial, como son la calidad organoléptica y nutricional de los productos.

Los desarrollos tecnológicos recientes en los procesos de secado por aire caliente parten de la consideración de diferentes aspectos; entre los más importantes se pueden resaltar el agrupamiento o modificación de las tecnologías de secado existentes dentro de tecnologías híbridas que son más eficientes y limpias que las tecnologías tradicionales. Una de las tecnologías consideradas para abordar estos aspectos es el secado intermitente. El término intermitente agrupa aquellas tecnologías de secado que emplean condiciones de operación que varían durante el procesamiento.

A diferencia del secado convectivo que convencionalmente emplea condiciones de operación fijas, el secado intermitente se fundamenta en la implementación y combinación de condiciones variables tales como el suministro de calor, la temperatura, la humedad y velocidad del aire de secado (Bon y Kudra, 2007; Chua et al., 2003; Ho et al., 2002; Islam et al., 2003) (Figura 1).



**FIGURA 1.** Clasificación general de los esquemas de intermitencia aplicados al proceso de secado.

Según el número de publicaciones referenciadas en el Journal Citation Reports, la aplicación de secado intermitente ha sido poco estudiada en el procesamiento de productos hortofrutícolas. Por otro lado las diferentes investigaciones desarrolladas en el secado de alimentos indican que un estudio enfocado en la modelización matemática del proceso, a partir de los

principios de transferencia de calor y materia, su simulación y optimización computacional, son tareas adecuadas para analizar el efecto de las variables, sobre el proceso, así como para el establecimiento de condiciones óptimas de operación que permitan optimizar la eficiencia de la operación y obtención de productos de mejor calidad (Váquiro, H. 2009).

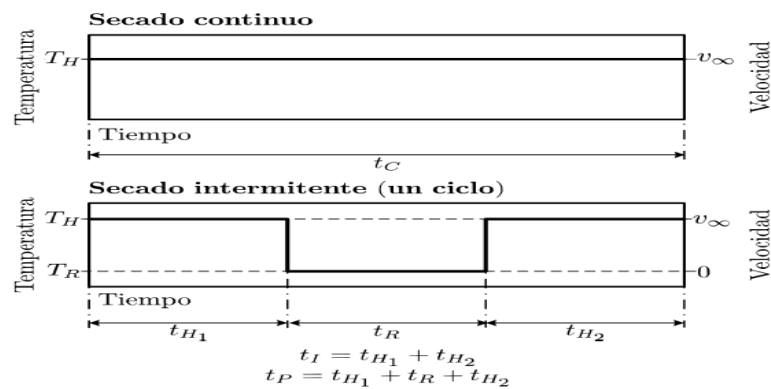
En base a lo expuesto, el objetivo de este trabajo ha sido el desarrollo de una herramienta de optimización de la aplicación del secado intermitente en un producto destacado comercialmente como es el caso de la patata, estableciendo como multiobjetivo minimizar el consumo energético y preservar la calidad del producto a través de la ganancia entálpica.

## MATERIALES Y METODOS

### Secado Intermitente: condiciones de operación

Para la realización de las experiencias de secado se consideraron dos esquemas de operación (Fig. 2): experiencias donde el suministro de energía térmica es continuo y experiencias donde el suministro de energía térmica es intermitente.

En los esquemas de operación, el secado continuo es aquel que se desarrolla de forma convencional haciendo fluir aire caliente sobre el producto a una velocidad ( $V_{\infty}$ ) y una temperatura ( $T_H$ ) constantes durante el proceso de secado. Por otro lado, se ha considerado secado intermitente al proceso donde el suministro de energía térmica es controlado por periodos consecutivos de calentamiento y reposo. Dos periodos de calentamiento separados por uno de reposo definen un ciclo. Durante los periodos de reposo ( $t_R$ ) el aire no es forzado a circular sobre el producto y se encuentra a una determinada temperatura ( $T_R$ ). El valor de la misma corresponde a la temperatura de la cámara de secado, la cual tiende rápidamente a la temperatura ambiente a medida que transcurre el reposo. El tiempo de calentamiento efectivo ( $t_I$ ) está determinado por suma de la duración de los periodos de calentamiento. El tiempo total del proceso de secado intermitente ( $t_P$ ) está determinado por la suma de la duración de los periodos de calentamiento y reposo.



**FIGURA 2.** Esquema de las condiciones del aire empleadas en las experiencias de secado continuo e intermitente

## Optimización del proceso de secado: modelización de la toma de decisiones

La aplicación del secado intermitente, además de aumentar la eficiencia energética del proceso, podría mejorar la calidad del producto disminuyendo su ganancia entálpica, su temperatura superficial y el tiempo de exposición del producto al tratamiento térmico (Bon y Kudra 2007).

Estableciendo como multiobjetivo perseguido minimizar el consumo energético y preservar la calidad del alimento, y de acuerdo a las consideraciones de Bon y Kudra (2007), la ganancia entálpica media del producto ponderada por la ganancia entálpica máxima, es una función objetivo adecuada para estimar y optimizar el impacto de las condiciones tiempo-temperatura en el proceso de secado intermitente.

Se define como ganancia entálpica en un instante determinado la diferencia entre el contenido entálpico del producto en ese instante y el contenido entálpico del producto en el comienzo del proceso. De esta manera, la ganancia entálpica del producto  $G(t)$  (Ec.1), se corresponde con el calor total transmitido por convección entre el aire y el sólido menos el calor total requerido para evaporar el agua que llega a la superficie del cilindro (Ec.1).

$$G(t) = \int_0^t \left[ \int_A [h(T_\infty - T_s) - m_v Q_s] dA \right] \quad (1)$$

Finalmente, la ganancia entálpica fue promediada ( $\bar{G}$ , Ec. 2) y ponderada por la ganancia entálpica máxima para obtener la función objetivo ( $FO$ , Ec. 3), siendo  $t_p$  el tiempo total del proceso.

$$\bar{G} = \frac{1}{t_p} \int_0^{t_p} G dt \quad (2)$$

$$FO = \bar{G} \text{máx} [G(t)] \quad (3)$$

Para modelar la toma de decisiones y optimizar el secado intermitente de patata, se seleccionó la intermitencia por suministro periódico de energía térmica, alternando ciclos de calentamiento y de reposo. Entre las diferentes variables controlables que pueden variar la intermitencia, como el número de ciclos, los tiempos de calentamiento y reposo en los diferentes ciclos, la temperatura y la velocidad del aire, se identificaron como variables decisorias la duración de los intervalos de calentamiento y de los intervalos de reposo. El problema de optimización fue definido literalmente como la búsqueda de los tiempos de duración de cada periodo de calentamiento y reposo, que minimizaran la función objetivo, estableciendo inicialmente el número de ciclos (N).

$$\text{Minimizar } FO(\vec{t}_H, \vec{t}_R) \quad (4)$$

$$\vec{t}_H = (t_{H_1}, t_{H_2}, \dots, t_{N+1}); \vec{t}_R = (t_{R_1}, t_{R_1}, \dots, t_{R_n}) \quad (5)$$

$$t_I = \sum_{i=1}^{N+1} t_{H_i} \quad (6)$$

$$t_p = \sum_{i=1}^{N+1} t_{H_i} + \sum_{j=1}^N t_{R_j} \quad (7)$$

En las anteriores ecuaciones,  $\vec{t}_H$  y  $\vec{t}_R$  son los vectores para los tiempos de duración de los periodos de calentamiento y reposo, respectivamente;  $t_I$  es el tiempo de calentamiento efectivo del proceso de secado intermitente;  $t_c$  es el tiempo total del proceso de secado continuo;  $t_p$  es el tiempo total del proceso de secado intermitente.

El problema de optimización fue sometido a las siguientes restricciones:

- El tiempo de calentamiento total no debe exceder la duración del tiempo de calentamiento en un proceso de secado continuo a iguales condiciones:

$$t_I = \sum_{i=1}^{N+1} t_{H_i} \leq t_c$$

- El tiempo total del proceso no deber exceder en más de una cierta proporción ( $\tau = 1.3$ ) el tiempo total de secado continuo:  $t_p \leq \tau t_c$

- Establecimiento de la humedad final del producto deseada:

$$\bar{W}_f \leq 0.3 \text{kg} / \text{kg}$$

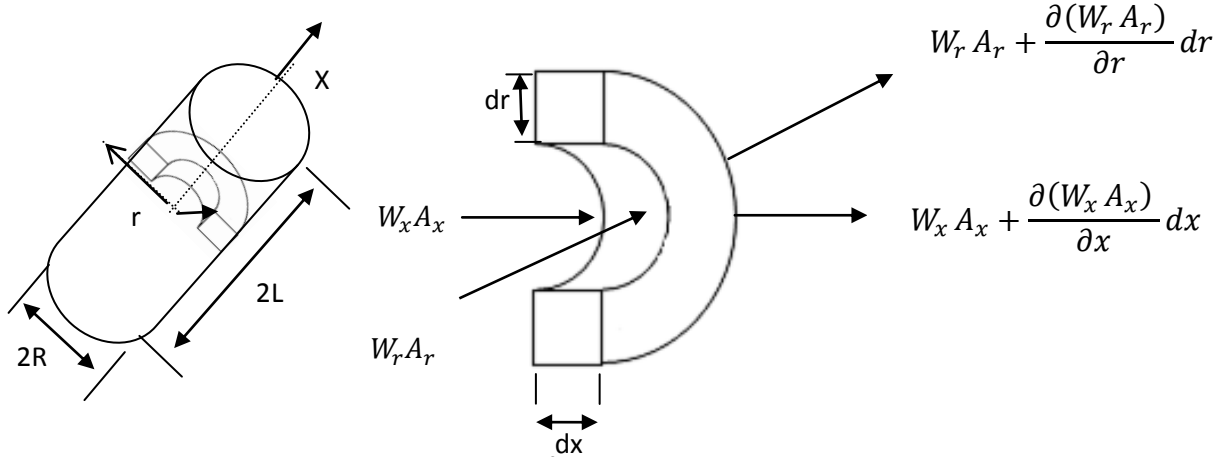
## Modelización del proceso

Para concluir la formulación del problema de optimización se requiere modelizar el proceso de secado con suficiente exactitud, desarrollando modelos que permitan predecir la evolución de las propiedades de interés.

Se desarrolló un modelo difusivo de transferencia de materia y calor en un sistema de forma cilíndrica. La formulación de las ecuaciones de gobierno fue realizada considerando que el material era homogéneo e isótropo, que el efecto de la contracción sobre los procesos de transferencia era despreciable, y que las propiedades de transporte (difusividad efectiva y conductividad térmica) eran funciones de los valores locales de humedad y/o temperatura.

## Transferencia de materia

A partir del balance de agua en régimen no estacionario para el volumen de control diferencial (Figura 3) el transporte de materia al interior del sólido puede ser expresada según la Ecuación 8.



**FIGURA 3.** Volumen de control diferencial. Flujos de materias entrantes y salientes.

$$0 = \frac{\partial(W_r A_r) dr}{\partial r} + \frac{\partial(W_x A_x) dx}{\partial x} + \frac{\partial M_W}{\partial t} \quad (8)$$

$W_r$  y  $W_x$  son flujos de materia por unidad de área en la dirección radial y longitudinal, respectivamente,  $A_x$  y  $A_r$  ( $m^2$ ) son las áreas superficiales del volumen de control, y  $M_W$  el contenido de humedad en el volumen de control.

Asumiendo que el principal mecanismo de transporte de humedad es la difusión líquida, los flujos de materia pueden ser expresados aplicando la ley particular de Fick (Ec.9).

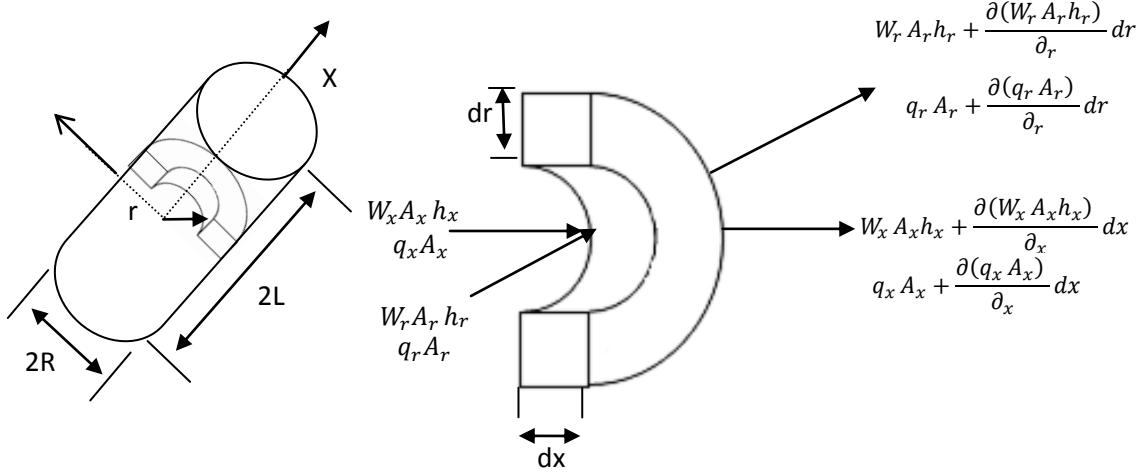
$$W_r = -D_e \frac{\partial c}{\partial r}; \quad W_x = -D_e \frac{\partial c}{\partial x} \quad (9)$$

Al sustituir la Ec. 9 en la Ec. 8 y teniendo en cuenta las superficies consideradas, se obtiene la ecuación de gobierno para la transferencia de materia (Ec.10), siendo  $A_x = 2\pi r dr$ ,  $A_r = 2\pi r dx$  y considerando  $M_W = W 2\pi r dr dx$ .

$$0 = \frac{\partial}{\partial r} \left( D_e r \frac{\partial W}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left( D_e r \frac{\partial W}{\partial x} \right) + r \frac{\partial W}{\partial t} \quad (10)$$

## Transferencia de calor

Para obtener la correspondiente ecuación de gobierno, se realizó el balance de energía en régimen no estacionario en un volumen de control diferencial (Figura 4).



**FIGURA 4.** Volumen de control diferencial. Flujos de energías entrantes y salientes.

$q_r$  y  $q_x$  son flujos de calor por unidad de área en la dirección  $x$  y  $r$ ,  $h_x$  y  $h_r$  son las entalpías específicas asociadas a la cantidad de materia que se transfiere en la dirección  $x$  y  $r$ , y  $H$  es la entalpía del material del volumen de control.

Efectuando el balance de energía calorífica en volumen de control, descartando el efecto de contracción y considerando el material homogéneo e isótropo, se obtiene la siguiente ecuación.

$$0 = \frac{\partial(q_r A_r) dr}{\partial r} + \frac{\partial(q_x A_x) dx}{\partial x} + \frac{\partial(W_r A_r h_r) dr}{\partial r} + \frac{\partial(W_x A_x h_x) dx}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} \quad (11)$$

Los flujos de calor por unidad de área pueden expresarse aplicando la ley particular Fourier (Ec.12) considerando la transferencia de calor en el sólido por conducción.

$$q_r = -k \frac{\partial T}{\partial r}; \quad q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (12)$$

Al sustituir la Ec.12 en la Ec.11, y considerando que la entalpía específica del material sería la suma de la entalpía específica del sólido seco y del agua que contiene, se obtiene la ecuación de gobierno para la transferencia de calor.

$$r D_e \rho_{ss} C p_w \left[ \frac{\partial W}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial r} \frac{\partial T}{\partial r} \right] = r \rho_{ss} (C p_{ss} + W C p_w) \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial r} \left( k r \frac{\partial T}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left( k r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (13)$$



### **Condiciones iniciales y de contorno**

Para resolver las ecuaciones en derivadas parciales que definen las ecuaciones de gobierno (Ecs. 10 y 13), son necesarias las condiciones relativas al tiempo (Ec. 14) y condiciones espaciales, como las condiciones físicas que existen en la barrera del sólido (Ecs. 11, 16 - 21).

Considerando que inicialmente la humedad y la temperatura son uniformes en el producto al comienzo del proceso de secado, se obtienen las siguientes condiciones iniciales:

$$W(x, y, z, 0) = W_0 \wedge T(x, y, z, 0) = T_0 \quad (14)$$

Para el caso específico de secado intermitente las condiciones finales del primer periodo de secado serán las condiciones iniciales del periodo de reposo, y del mismo modo las condiciones finales de reposo serán las condiciones iniciales del segundo periodo de secado.

Asumiendo que existe simetría en la distribución de la humedad y la temperatura, se obtienen estas condiciones de contorno.

$$\frac{\partial W}{\partial r}(x, 0, t) = 0; \quad \frac{\partial W}{\partial x}(0, r, t) = 0 \wedge \frac{\partial T}{\partial r}(x, 0, t) = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial x}(0, r, t) = 0 \quad (15)$$

La transferencia de materia a través de la superficie del sólido puede ser expresada asumiendo que el agua líquida que se difunde hacia la superficie por unidad de área se evapora a la misma velocidad (equilibrio dinámico), y se transporta por convección en el aire.

$$-D_e \rho_{ss} \frac{\partial W}{\partial r}(x, R, t) = K_M [C_{s-} - C_{\infty}] \quad (16)$$

$$-D_e \rho_{ss} \frac{\partial W}{\partial x}(L, r, t) = K_M [C_{s-} - C_{\infty}] \quad (17)$$

Asumiendo que el aire húmedo (mezcla de aire y vapor de agua) se comporta como un gas ideal, se pueden obtener las siguientes ecuaciones:

$$-D_e \rho_{ss} \frac{\partial W}{\partial r}(x, R, t) = \frac{K_M P M_v}{\mathcal{R}} \left[ \frac{\varphi P_s}{T} - \frac{\varphi_{\infty} P_{s\infty}}{T_{\infty}} \right] \quad (18)$$

$$-D_e \rho_{ss} \frac{\partial W}{\partial x}(L, r, t) = \frac{K_M P M_v}{\mathcal{R}} \left[ \frac{\varphi P_s}{T} - \frac{\varphi_{\infty} P_{s\infty}}{T_{\infty}} \right] \quad (19)$$

Por otro lado la transferencia de calor a través de la superficie del sólido en la dirección  $x$  o  $r$  puede ser expresada asumiendo que el calor transmitido por convección hacia el sólido es utilizado tanto para elevar la temperatura del material como para evaporar el agua que llega a la superficie.

$$k \frac{\partial T}{\partial x}(L, r, t) = h[T_{\infty} - T(L, r, t)] - D_e \rho_{ss} \frac{\partial W}{\partial x}(L, r, t) Q_s \quad (20)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial x}(x, R, t) = h[T_{\infty} - T(x, R, t)] - D_e \rho_{ss} \frac{\partial W}{\partial r}(x, R, t) Q_s \quad (21)$$

### **Relaciones subsidiarias**

Para concluir la formulación de transferencia de materia y calor se establecen las ecuaciones adicionales que se especifican en este apartado.

El modelo de difusividad se ha considerado dependiente de la temperatura puntual mediante la ecuación de Arrhenius

$$D_e = D_1 \times \exp\left(-\frac{D_2}{T+273.16}\right) \quad (22)$$

Para completar la formulación del modelo matemático, fueron consideradas las ecuaciones para la estimación de las propiedades térmicas del producto, las isotermas de sorción, el calor isostérico de sorción, los coeficientes de transferencia de calor y materia por convección natural y forzada (Váquiro, 2009), así como los datos psicrométricos (ASAE, 1999).

#### *Isotermas de sorción*

Para las isotermas de sorción se realizó un estudio bibliográfico. Los parámetros del modelo de GAB (Wang y Brennan, 1991; McLaughlin y Magee, 1998; Chou et al., 2000; McMinn and Magee, 2003) utilizados para la modelización de las isotermas de sorción de patata se muestran en la Tabla 1.

**Tabla.1** Datos utilizados para la modelización de la isoterma de sorción de patata

<b>Modelo de GAB</b>	<b>Valores calculados para el modelo</b>
$W_e = W_m \frac{CgKga_w}{(1 - Kga_w)[1 + (Cg - 1)Kga_w]}$	$W_m = 0.4264$
<b>Donde:</b>	$Kg_0 = 0.9734$
$Kg = Kg_0 \exp\left(\frac{AH_k}{RT}\right)$	$AH_k = -0.9520$
$Cg = Cg_0 \exp\left(\frac{AH_c}{RT}\right)$	$Cg_0 = 3.7786 \times 10^{-5}$
	$AH_c = 2.0400 \times 10^4$

Propiedades termofísicas (Srikiatden y Roberts, 2007).

- Conductividad térmica

$$k = \frac{W}{1+W} k_w + k_{ss} \quad (23)$$

- Conductividad térmica del agua

$$k_w = (5.07109 \times 10^{-4} + 1.762 \times 10^{-6} T - 6.7036 \times 10^{-9} T^2) 1000 \quad (24)$$

- Calor específico del Sólido seco

$$C_{p_{ss}} = 4184(0.406 + 0.00146T + 0.203W - 0.0249W^2) \quad (25)$$

- Calor específico del agua

$$C_{p_w} = (4.1762 - 0.00009086W + 0.0000054731W^2) 1000 \quad (26)$$

Calor isostérico de sorción

$$Q_s = \lambda - \frac{R}{PM_V} \frac{\partial(\ln(a_w))}{\partial\left(\frac{1}{T}\right)} \quad \text{Ecuación de Clausius Clapeyron} \quad (27)$$

Para estimar el calor isostérico se empleó la isoterma para calcular analíticamente la derivada que aparece en la ecuación de Clausius Clapeyron.

Coefficientes de transferencia de calor forzado y natural

- Forzado (Calentamiento) (Ahmed y Yovanovich, 1995).

Para estimar el coeficiente de transferencia de calor:

$$Nu = 3.192 + \frac{2.773 \left(\frac{L}{R}\right)^{0.76}}{\sqrt{\left(1+2\frac{L}{R}\right)}} + 1.012 \left(\frac{L}{R}\right)^{0.25} Re^{0.5} FPr \quad (28)$$

$$FPr = \frac{Pr^{\frac{1}{3}}}{\left((2\gamma+1)^3 + \left(\frac{1}{Pr}\right)\right)^{\frac{1}{6}}} \quad (29)$$

$$FSc = \frac{Sc^{\frac{1}{3}}}{\left((2\gamma+1)^3 + \left(\frac{1}{Sc}\right)\right)^{\frac{1}{6}}} \quad (30)$$

$$\gamma = \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{Re^{0.75}}{300}\right)^5\right)^{\frac{1}{5}}} \quad (31)$$

Por analogía para estimar el coeficiente de transferencia de materia:

$$Sh = 3.192 + \frac{2.773 \left(\frac{L}{R}\right)^{0.76}}{\sqrt{\left(1+2\frac{L}{R}\right)}} + 1.012 \left(\frac{L}{R}\right)^{0.25} Re^{0.5} FSc \quad (32)$$

- Natural (repos) (Yovanovich, and Culham, 1997).

Para estimar el coeficiente de transferencia de calor:

$$Nu = Nu_0 + FPr Gn Ra^{\frac{1}{4}} \quad (33)$$

$$FPr = \frac{0.670}{\left(1 + \left(\frac{0.5}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right)^{\frac{4}{9}}} \quad (34)$$

$$Gn = 0.891 \frac{\left(0.681 + \frac{L}{R}\right)^{\frac{7}{8}}}{\left(0.5 + \frac{L}{R}\right)^{\frac{7}{8}}} \quad (35)$$

$$Nu_0 = \frac{\left(3.192 + 2.773 \left(\frac{L}{R}\right)^{0.76}\right)}{\sqrt{1 + 2\frac{L}{R}}} \quad (36)$$

$$Ra = GrPr \quad (37)$$

Por analogía para estimar el coeficiente de transferencia de materia:

$$Sh = Nu_0 + FPr Gn (Gr Sc)^{\frac{1}{4}} \quad (38)$$

## Identificación paramétrica

Para completar la modelización del proceso es necesario identificar el valor de la difusividad efectiva, propiedad de transporte presente en el modelo matemático que se ha formulado (Ecs. 10- 21).

La identificación de la difusividad efectiva se realizó a partir del ajuste del modelo del proceso a los datos experimentales. El ajuste se realizó de forma simultánea mediante la información experimental (contenido de humedad promedio y temperatura en el centro del cilindro de patata) de los procesos de secado continuo e intermitente.

Los criterios de ajuste fueron definidos a partir del error absoluto promedio normalizado entre los valores experimentales y los calculados:

$$f_W = \sum_{i=1}^{n_d} \frac{|\overline{W} \exp_i - \overline{W} \text{cal}_i|}{\sum_{i=1}^{n_d} \overline{W} \exp_i} \quad (39); \quad f_T = \sum_{i=1}^{n_d} \frac{|T \exp_i - T \text{cal}_i|}{\sum_{i=1}^{n_d} T \exp_i} \quad (40)$$

donde  $f_w$  y  $f_T$  son los criterios de ajuste relacionados con los datos de humedad y temperatura, respectivamente;  $n_d$  es el número de puntos de la experiencia;  $\overline{W}$  es el contenido de humedad promedio; y  $T$  es la temperatura en el centro del cilindro de patata.

Los criterios permiten que las magnitudes de las variables (contenido de humedad promedio y temperatura en el centro) sean comparables, lo cual establece igual importancia a cada criterio dentro de los ajustes.

Para la identificación de los parámetros del modelo a partir de los datos experimentales se planteó un problema de optimización multiobjetivo (Liu et al., 2003). Los parámetros  $D_1$  y  $D_2$  del modelo de la difusividad efectiva fueron establecidos como las variables decisorias, y como función objetivo (Ec. 41) la suma de los criterios de ajuste ( $f_w+f_T$ ). En el cálculo de  $f_D$  se consideran simultáneamente los resultados de las experiencias de secado continuo e intermitente realizadas para la identificación, lo cual asegura que los parámetros identificados consideren y representen las características del material independientemente de las condiciones experimentales aplicadas en los ensayos.

$$\text{Minimizar } f_D(D_1, D_2) = \sum_{i=1}^{n_m} (f_{w_i} + f_{T_i}) \quad (41)$$

## Experiencias de secado

### Materia prima y preparación de la muestra

Las patatas utilizadas en este trabajo corresponden a la variedad Monalisa adquiridas en los supermercados de esta localidad. En la Tabla 2 se muestran la composición media de las patatas.

La preparación de las muestras para las experiencias de secado consistió en extraer muestras cilíndricas con un sacabocados, cortando posteriormente los extremos para obtener cilindros con  $19 \pm 0.1$  mm de diámetro y  $35 \pm 0.1$  mm de altura, con un peso medio de  $10.5 \pm 0.3$  g.

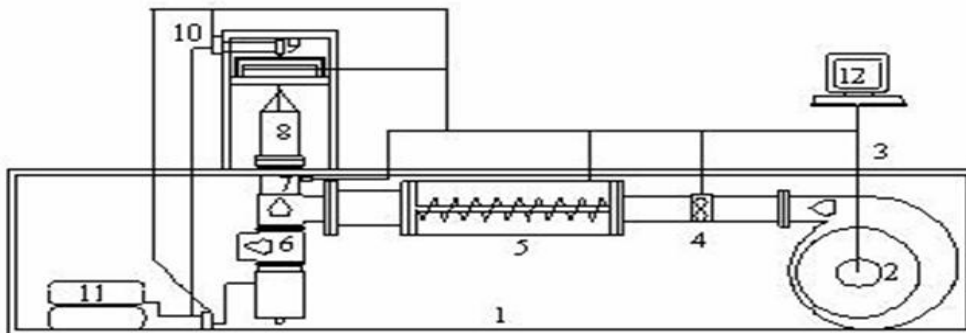
Para determinar el contenido de humedad en la patata se siguió el procedimiento de la AOAC número 934.06 (AOAC, 1997). La determinación de la humedad experimental de las muestras se realizó en todos los casos por triplicado.

**TABLA 2.** Fracción másica de los componentes de la patata (USDA Nutrient Data Laboratory (2003).

Componentes					
Agua	Proteína	Carbohidratos	Fibra	Grasas	Cenizas
0.8443	0.0157	0.1229	0.0095	0.0006	0.0083

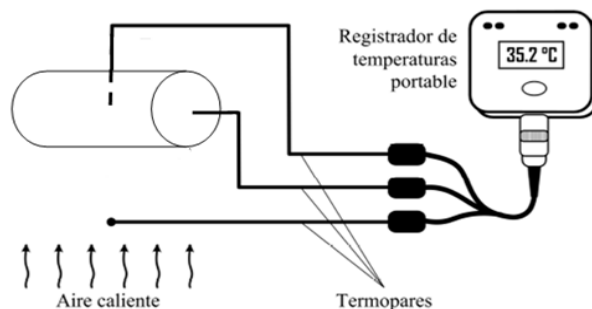
### Equipo de secado

El equipo de secado empleado (Bon et al. 1994) consiste en un secadero convectivo a escala de laboratorio, con control automático de temperatura y velocidad de aire de secado y registró automático de la evolución del peso de las muestras. En la Figura 5 se detallan las diferentes partes de dicho secadero.



**FIGURA 5.** Esquema del secadero convectivo a escala de laboratorio empleado en las experiencias de secado. 1. Soporte; 2. Soplante; 3. Control de flujo; 4. Anemómetro; 5. Resistencia calefactora; 6. Válvula neumática; 7. Sensor de temperatura (PT-100); 8. Cámara de secado con portamuestras; 9. Balanza de pesada rápida; 10. Elevador de aire; 11. Compresor de aire; 12. Ordenador de adquisición de datos y control.

Un registrador/indicador de temperatura portable (Diligence EV N2014 Thermocouple data logger, Comark Limited, Hertfordshire, Reino Unido) fue acoplado al equipo de secado para el registro, a intervalos de tiempos predefinidos, de las temperaturas en el centro y en la superficie de la muestra (cilindro), junto con la temperatura del aire cercano a la misma (Figura 6).



**FIGURA 6.** Esquema de la medición de temperaturas en el centro y superficie de la muestra.

### Cinéticas de secado

Las muestras cilíndricas, previamente atemperadas a 20°C, fueron secadas mediante procesos continuos e intermitentes (de un ciclo) a diferentes temperaturas de calentamiento (40, 50, 60°C) y velocidades de aire de 1 y 2 ms<sup>-1</sup>. Las experiencias se realizaron por triplicado hasta alcanzar una pérdida de humedad superior al 80%

En la tabla 3 se muestran las condiciones de operación de las diferentes experiencias preparadas para identificar los parámetros del modelo del proceso.

**TABLA 3.** Condiciones de operación utilizadas para las diferentes experiencias de secado

	Velocidad m s <sup>-1</sup>	T <sub>H</sub> (°C)	Duración del proceso
Continuo	1	40	t <sub>C</sub> hasta PP ≥80%
	2	40	
	1	50	
	2	50	
	1	60	
	2	60	
Intermitente	1	40	t <sub>H1</sub> =7h; t <sub>R</sub> =2h; t <sub>H2</sub> hasta PP≥80%
	2	40	t <sub>H1</sub> =6h; t <sub>R</sub> =2h; t <sub>H2</sub> hasta PP≥80%
	1	50	t <sub>H1</sub> =5h; t <sub>R</sub> =2h; t <sub>H2</sub> hasta PP≥80%
	2	50	t <sub>H1</sub> =4.5h; t <sub>R</sub> =2h; t <sub>H2</sub> hasta PP≥80%
	1	60	t <sub>H1</sub> =4h; t <sub>R</sub> =2h; t <sub>H2</sub> hasta PP≥80%
	2	60	t <sub>H1</sub> =3.5h; t <sub>R</sub> =2h; t <sub>H2</sub> hasta PP≥80%

### Simulación y optimización del proceso

La herramienta COMSOL Multiphysics® 3.4 fue utilizada para resolver, aplicando el método de elementos finitos, el conjunto de ecuaciones en derivadas parciales que definen el modelo del proceso (COMSOL AB., 2007). La herramienta Matlab® fue empleada en el desarrollo de los algoritmos generales para el ajuste del modelo del proceso a los datos experimentales y la resolución de los problemas de optimización. En el ajuste del modelo y en la optimización del proceso fue empleada la función 'fminsearch', la cual utiliza un método basado en el gradiente para encontrar mínimos locales de problemas de optimización no lineales multivariantes (The MathWorks, 2007).

### Análisis estadístico

La raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) (Ec.42) y la varianza explicada (VAR) (Sheskin, 2004), fueron los estadísticos usados para evaluar la bondad de los ajustes.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n_d} \sum_{i=1}^{n_d} (Z_{exp} - Z_{cal})^2} \quad (42)$$

## RESULTADOS Y DISCUSION

### Herramienta de toma de decisiones

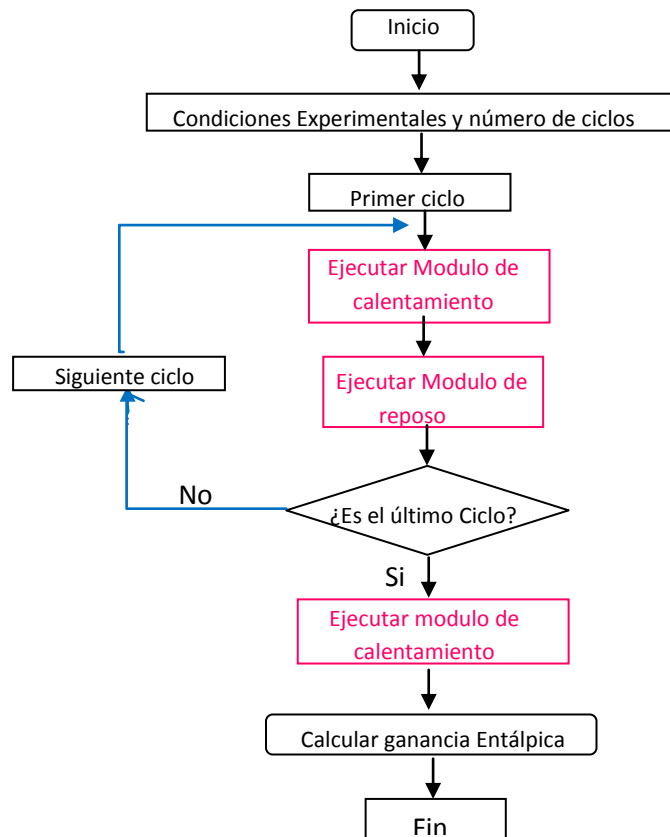
#### Algoritmos computacionales

A fin de resolver el modelo del proceso (Ecs.10, 13-21), realizar la identificación de los parámetros y la resolución de los problemas de optimización, se desarrollaron algoritmos empleando las herramientas computacionales COMSOL Multiphysics® 3.4 y Matlab® R2007b.

Con el objeto de facilitar el desarrollo del algoritmo para la simulación del proceso de secado intermitente (Figura 7), se desarrolló una programación modular de los periodos de calentamiento y reposo en el código Matlab®.

Para la identificación paramétrica el algoritmo desarrollado (Figura 8) se estableció inicialmente la ubicación de los ficheros que contienen la información experimental de las experiencias que son utilizadas en la identificación paramétrica. El modelo fue posteriormente resuelto a las condiciones experimentales almacenadas en cada uno de los ficheros, y a partir de los resultados simulados y de los valores experimentales se determinaron los criterios de ajuste  $f_w$  (Ec. 39) y  $f_T$  (Ec. 40).

Una vez completada la solución para la totalidad de ficheros de las experiencias la herramienta desarrollada calcula la función objetivo  $f_D$  (Ec.41).



**Figura 7.** Organigrama del algoritmo para la simulación del proceso de secado intermitente

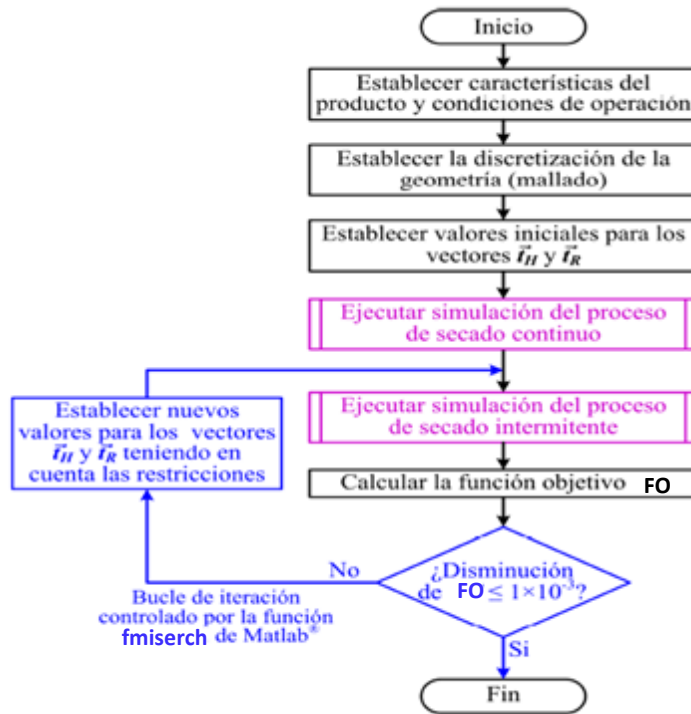




**FIGURA 8.** Organigrama del algoritmo para la identificación de los parámetros del modelo.

Del mismo modo para la resolución del problema de optimización de la aplicación de secado intermitente fue desarrollada de acuerdo al algoritmo de la Figura 9. En cada problema de optimización se fijaron como características del producto los valores promedio de aquellas correspondientes a las experiencias de secado.

Tal como se indica en la Figura 9, se ejecutó la simulación del proceso de secado continuo luego de establecer las características del producto, las condiciones de operación, la discretización de la geometría y los valores iniciales para los vectores de los periodos de calentamiento y reposo.



**FIGURA 9.** Organigrama del algoritmo para la optimización del proceso de secado intermitente

### Identificación paramétrica de difusividad efectiva

En la identificación de parámetros del modelo de la difusividad efectiva fue empleada información experimental de cinéticas de secado continuo e intermitente de cilindros de patata a diferentes temperaturas de calentamiento y diferentes velocidades.

Todas las cinéticas siguieron un comportamiento propio del secado de productos agroalimentarios; es decir, a mayores temperaturas de calentamiento la velocidad de secado se incrementó, con la consiguiente reducción del tiempo del proceso. La temperatura en el centro de las muestras siguió una tendencia hacia el valor de la temperatura de calentamiento, con un incremento considerable al inicio del proceso cuando es mayor el gradiente entre las temperaturas del aire y del material. La evolución de la temperatura fue similar en las experiencias de secado continuo e intermitente. En el periodo de reposo de las experiencias de secado intermitente las condiciones aún favorecen la pérdida de humedad en el material, la cual es mayor al inicio de los periodos de reposo cuando la temperatura del producto comienza a disminuir. Sin embargo, esta pérdida de humedad ocurre a una velocidad considerablemente menor que en los periodos de calentamiento al estar regida por fenómenos de transferencia por convección natural. En este periodo, la temperatura del material tiende rápidamente al valor de la temperatura de reposo (temperatura ambiente).

Con el propósito de identificar el modelo de la difusividad efectiva (Ec. 22), se llevó a cabo el procedimiento para la identificación de los parámetros del modelo a partir de los datos experimentales, obteniéndose como resultados para  $D_1$   $6.091 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  y para  $D_2$   $4.1315 \times 10^3 \text{ kJ}$  respectivamente.

$$D_e = 6.09 \times 10^4 \times \exp\left(-\frac{4.1315 \times 10^3}{T+273.16}\right) \quad (41)$$

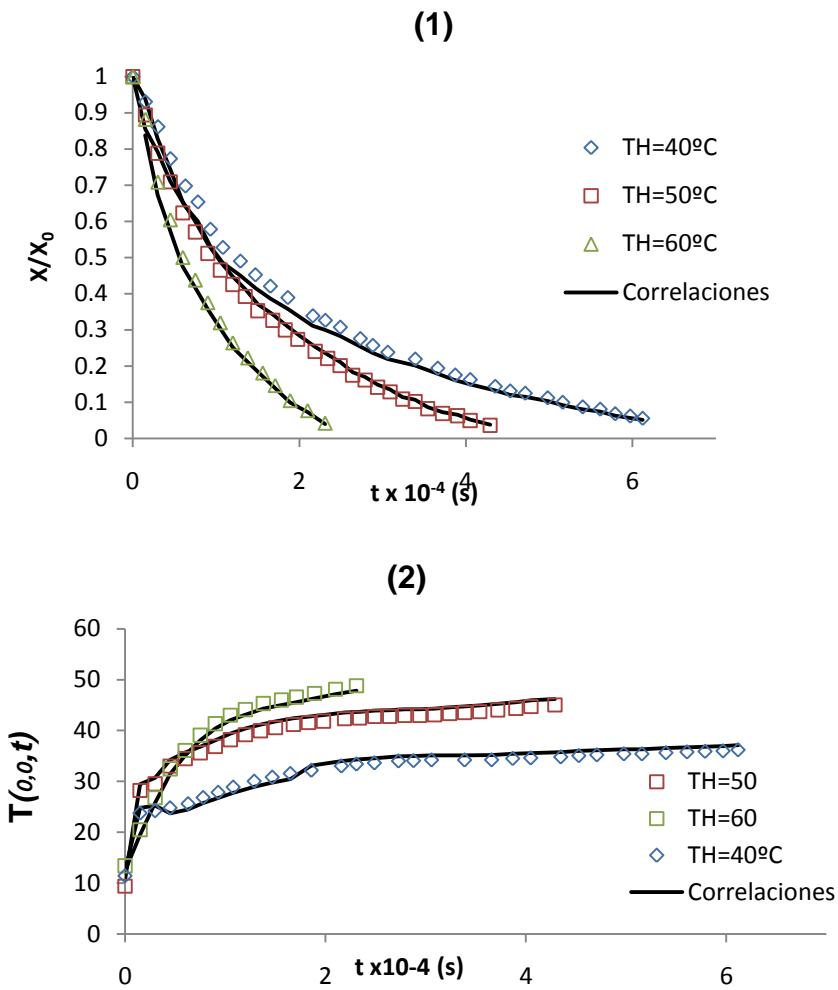
Los resultados estadísticos indicaron una buena correlación entre los valores estimados y los datos experimentales para la humedad (VAR> 95.5% y RMSE < 3.53) y la temperatura (VAR> 92.2% y RMSE< 4.345), como se muestra en la tabla (Tabla 4).

**TABLA 4.** Resultados estadísticos de la identificación de los parámetros del modelo de difusividad efectiva.

Experiencias	Velocidad del Aire ( $ms^{-1}$ )	$T_H$ ( $^{\circ}C$ )	Contenido de humedad promedio		Temperatura en el centro	
			RMSE	VAR(%)	RMSE	VAR(%)
<i>Continuo</i>	1	40	0.090	99.55	1.047	97.5
	2	40	0.074	99.69	0.912	96.0
	1	50	0.075	99.52	1.777	98.3
	2	50	0.095	99.68	2.366	96.6
	1	60	0.064	99.83	3.249	95.5
	2	60	0.115	99.49	3.530	98.0
<i>Intermitente</i>	1	40	1.009	98.18	3.408	92.2
	2	40	1.059	98.17	4.345	97.0
	1	50	1.551	99.15	4.162	97.9
	2	50	1.235	98.23	3.258	96.3
	1	60	1.89	98.98	4.236	98.1
	2	60	2.55	99.01	3.998	94.5

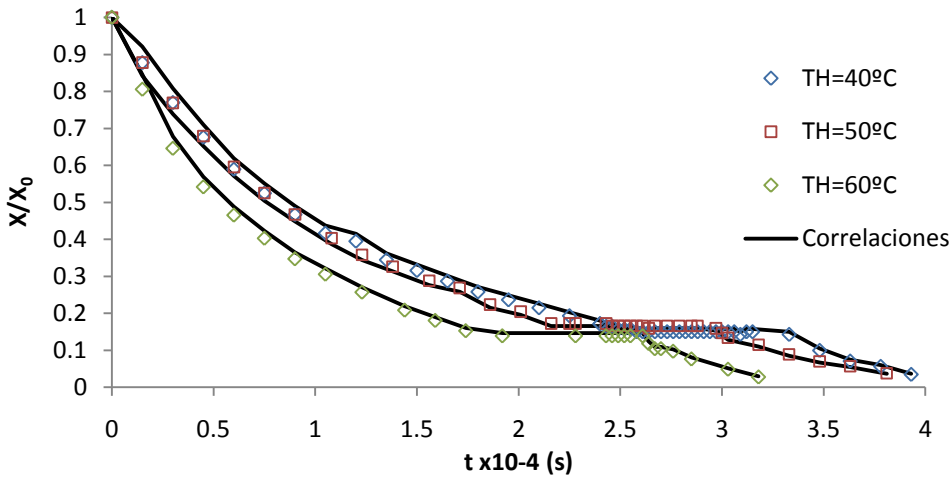
En las Figuras 10 y 11 se muestra la evolución de la temperatura en el centro del cilindro y la humedad adimensional, a temperaturas de calentamiento de 40, 50, y 60  $^{\circ}C$ , y velocidad de aire de 1  $ms^{-1}$ , para las experiencias de secado continuo e intermitente empleadas en el ajuste del modelo. En todas las gráficas se presenta el contenido de humedad adimensional promedio ( $\bar{X}/X_0$ ) con el propósito de facilitar la representación de los datos experimentales en muestras de diferente humedad inicial.

La identificación se realizó con la totalidad de los puntos experimentales (registros de la humedad promedio y la temperatura en el centro del cilindro cada 5 min hasta la finalización del ensayo). Se puede observar una buena correlación entre los datos obtenidos experimentalmente y los datos calculados en el modelo propuesto.

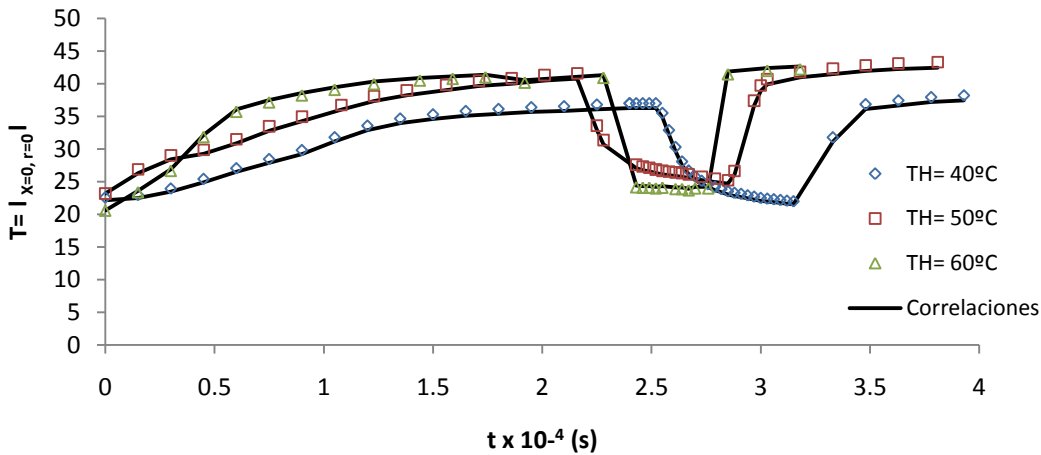


**FIGURA 10.** Resultados de la identificación de los parámetros del modelo de la difusividad efectiva en experiencias de secado continuo a temperaturas de calentamiento ( $T_H$ ) de 40, 50 y 60°C, y velocidad de aire ( $1 \text{ ms}^{-1}$ ). Valores experimentales y estimados del contenido de humedad adimensional promedio (1) y de la temperatura en el centro de las muestras (2).

(1)



(2)



**FIGURA 11.** Resultados de la identificación de los parámetros del modelo de la difusividad efectiva en experiencias de secado intermitente a temperaturas de calentamiento ( $T_H$ ) de 40, 50 y 60°C, y velocidad de aire ( $1 \text{ ms}^{-1}$ ). Valores experimentales y estimados del contenido de humedad adimensional promedio (1) y de la temperatura en el centro de las muestras (2).

En todos los ajustes estadísticos *VAR* y *RMSE* presentaron mejores resultados en la humedad que en la temperatura. En el ajuste de la temperatura en el centro de las muestras, la mayor diferencia entre los datos experimentales y estimados se presentó al inicio del proceso y durante los periodos de reposo del secado intermitente. Esta desviación sería producto de las simplificaciones y consideraciones usadas en la formulación del modelo del proceso.

Los resultados indicaron que el modelo del proceso describe adecuadamente la información experimental en el conjunto de datos empleados en la validación del modelo (Tabla 4).

## Secado intermitente versus al continuo

En la Tabla 5. Se muestran los resultados de los tiempos de calentamiento del proceso de secado continuo e intermitente. Se puede observar que el tiempo de calentamiento para el proceso de secado intermitente decreció respecto al proceso de secado continuo en un 23.21% ( $T_H = 40\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $V^\infty = 1\text{ ms}^{-1}$ ), un 24.62% ( $T_H = 40\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $V^\infty = 2\text{ ms}^{-1}$ ), un 25.75% ( $T_H = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $V^\infty = 1\text{ ms}^{-1}$ ) un 11.12% ( $T_H = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $V^\infty = 2\text{ ms}^{-1}$ ), un 12.5% ( $T_H = 60\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $V^\infty = 1\text{ ms}^{-1}$ ), y un 29.16% ( $T_H = 60\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $V^\infty = 2\text{ ms}^{-1}$ ). Estos porcentajes de reducción equivalen a una disminución entre 0.99 a 3.22 h para el tiempo de calentamiento.

**TABLA 5.** Comparación del tiempo de calentamiento entre procesos de secado continuo e intermitente a diferentes temperaturas de calentamiento, velocidades de aire y tiempo de reposo fijos de 2 h. Los valores entre paréntesis son el porcentaje de reducción del tiempo de calentamiento respecto al proceso de secado continuo.

Experiencias	Velocidad del Aire ( $\text{ms}^{-1}$ )	$T_H$ ( $^\circ\text{C}$ )	Tiempo del periodo de calentamiento			Tiempo total de proceso
			$t_{h1}$	$t_R$	$t_{H2}$	
Continuo	1	40	14			14
	2	40	13			13
	1	50	12			12
	2	50	9			9
	1	60	8			8
	2	60	6			6
Experiencias	Velocidad del Aire ( $\text{ms}^{-1}$ ) $^\infty$		Duración de los periodos de calentamiento y reposo h			Tiempo total de proceso
			$T_{H1}$	$t_R$	$t_{H2}$	
Intermitente	1	40	7	2	3.75	10.75 (23.21%)
	2	40	7	2	2.8	9.8 (24.62%)
	1	50	6	2	2.91	8.91 (25.75%)
	2	50	5	2	3	8 (11.12%)
	1	60	4	2	3	7 (12.5%)
	2	60	3	2	1.25	4.25 (29.16%)

Cabe resaltar que la diferencia podría incrementarse al plantear y resolver el problema de optimización empleando la herramienta desarrollada.

## CONCLUSIONES

El modelo del proceso describe adecuadamente el secado continuo e intermitente de patata, considerando los fenómenos de transferencia de materia y calor en el producto, así como los fenómenos de transferencia de materia y calor por convección natural y forzada en la interfase producto-aire.

La optimización se ha establecido como un paso necesario que permita un máximo aprovechamiento de las ventajas del proceso intermitente sobre el continuo, en cuanto a consumo energético directamente, y en cuanto a calidad del producto implícitamente. Por ello la herramienta de optimización desarrollada permitiría optimizar las condiciones de operación minimizando el tiempo de calentamiento y, por lo tanto, el consumo energético, y mejorando la calidad del producto final al disminuir su impacto térmico.

En particular el secado intermitente podría ser conveniente para reducir problemas de calidad superficiales, tales como el pardeamiento no enzimático y el encostramiento, ya que éste reduce la temperatura superficial así como el tiempo de calentamiento necesario para alcanzar un contenido de humedad final deseado.

## BIBLIOGRAFÍA

- Váquiro, H. (2009). Contribución al estudio y optimización del secado intermitente: aplicación al secado de Mango (*Mangifera indica* L var. Tommy Atkins). Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- Bon, J., Kudra, T. (2007). Enthalpy-driven optimization of intermittent drying, *Drying Technology* 25(4), 523-532.
- COMSOL AB. (2007). COMSOL multiphysics user's guide version 3.4, (COMSOL AB., Stockholm, Sweden).
- Srikiatden J. and Roberts S. (2007). Predicting moisture profiles in potato and carrot during convective hot air drying using isothermally measured effective diffusivity, *Journal of Food Engineering* 84 516-525.
- The MathWorks. (2007). MATLAB user's guide. The MathWorks Inc. SouthNatick, MA, USA.
- Strumillo, C., Jones, P.L., Zylla, R. (2006). Energy aspects in drying. En: Mujumdar, A.S. (ed.), *Handbook of Industrial Drying*, 3 edn. (CRC Press, Boca Raton, FL, USA).
- Sheskin, D. (2004). *Handbook of Parametric and Nonparametric Statistical Procedures*, 3 edn., CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- Chua, K.J., Mujumdar, A.S., Chou, S.K. (2003). Intermittent drying of bioproducts - an overview, *Bioresource Technology*, 90: 285-295.
- Islam, R., Ho, J.C., Mujumdar, A.S. (2003). Convective drying with timevarying heat input: Simulation results, *Drying Technology*, 21(7): 1333- 1356.
- Liu, G., Yang, J., Whidborne, J. (2003). *Multiobjective optimisation and control*, (Research Studies Press, Baldock, Hertfordshire, England).

- McMinn, W.A.M. and T.R.A. Magee (2003), Thermodynamic properties of moisture sorption of potato, *Journal of Food Engineering*, Vol. 60, pp. 157-165.
- USDA Nutrient Data Laboratory (2003). <http://www.nal.usda.gov/fnic/foodcomp> USDA, Agricultural Research Service, Beltsville, MD.
- Ho, J.C., Chou, S.K., Chua, K.J., Mujumdar, A.S., Hawlader, M.N.A. (2002). Analytical study of cyclic temperature drying: effect on drying kinetics and product quality, *Journal of Food Engineering*, 51(1): 65-75.
- Chou, S.K., Chua, K.J., Mujumdar, A.S., Hawlader M.N.A. and J.C. Ho (2000), On the intermittent drying of an agricultural product, *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, Vol. 78, pp. 193-203.
- ASAE. (1999). Psychrometric data, D271.2 DEC99, (American Society of Agricultural Engineers ASAE, USA).
- McLaughlin, C.P. and T.R.A. Magee (1998), The determination of sorption isotherm and the isosteric heats of sorption for potatoes, *Journal of Food Engineering*, Vol. 35, pp. 267-280.
- AOAC. (1997). Official methods of analysis of AOAC International, 16 edn., (Association of Official Analytical Chemist International AOAC, Gaithersburg, USA).
- Yovanovich, M.M., and Culham, JR., (1997). Natural Convection from horizontal Circular and Square Toroids and Equivalent Cylinders, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol 11, No. 3.
- Ahmed, G. R. and Yovanovich, M.M., (1995) Analytical Method for Forced Convection from Flat Plates, Circular Cylinders, and Spheres, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol 9 No. 3.
- Bon, J., Sanjuán, N., Tarrazó, J., Mulet, A. (1994). Drying kinetics of broccoli. En *Proceedings of the Poster Session, ISOPOW Practicum II*, Universidad de las Américas, Puebla, México.
- Wang, N. and J.G. Brennan (1991), Moisture sorption isotherm characteristics of potatoes at four temperatures, *Journal of Food Engineering*, Vol. 14, pp. 269-287.

## NOMENCLATURA

A	Área superficial (m <sup>2</sup> )
a <sub>w</sub>	Actividad de agua
AH <sub>c</sub>	Parámetro del modelo de GAB (kJ/mol)
AH <sub>c</sub>	Parámetro del modelo de GAB (kJ/mol)
C	Concentración del vapor de agua (kg/m <sup>3</sup> )
C <sub>∞</sub>	Concentración de vapor de agua fuera de capa limite (kg/m <sup>3</sup> )
C <sub>g</sub>	Parámetro del modelo de GAB
C <sub>g0</sub>	Parámetro del modelo de GAB
C <sub>pss</sub>	Calor específico del sólido seco (kJ/kg K)



$C_{p_w}$	Calor específico del agua (kJ/kg K)
$C_s$	Concentración del vapor de agua en el aire en contacto con el sólido (kg/m <sup>3</sup> )
$D_1$	Difusividad efectiva de referencia factor preexponencial (m <sup>2</sup> /s)
$D_2$	Parámetro del modelo de difusividad (K)
$D_e$	Difusividad efectiva (m <sup>2</sup> /s)
$f_d$	Función objetivo del problema de optimización para la identificación paramétrica
FO	Función objetivo (kJ <sup>2</sup> )
$FPr$	Función del número adimensional de Prandtl
$FSc$	Función del número adimensional de Schmidt
$f_T$	Error promedio absoluto para la temperatura
$f_w$	Error promedio absoluto para la humedad
G	Ganancia entálpica (kJ)
Gamma	Parámetro para determinar $FPr$
$\bar{G}_n$	Función de gravedad del cilindro
$Gr$	Número adimensional de Grashof
$\bar{G}$	Ganancia entálpica media (kJ)
H	Entalpia (kJ)
$h$	Entalpia específica (kJ/kg)
$h$	Coefficiente de transferencia de calor por convección (kW/m <sup>2</sup> K)
k	Conductividad térmica (kW/m K)
$K_g$	Parámetro del modelo de GAB
$K_{g0}$	Parámetro del modelo de GAB
$K_M$	Coefficiente de transferencia de materia (m/s)
$k_{ss}$	Conductividad térmica del sólido seco
$k_w$	Conductividad térmica del agua
L	Semilongitud del cilindro (m)
$m_v$	Flujo de vapor por unidad de área (kg/s m <sup>2</sup> )
$M_w$	Masa de agua (kg)
N	Número de ciclos
$n_d$	Número de datos utilizados en el ajuste
$n_m$	Numero de experiencias de secado utilizados en la modelización
$Nu$	Numero adimensional de Nusselt
$Nu_0$	Numero adimensional de Nusselt para la difusividad limite
$Pr$	Numero adimensional de Prandtl
$PM_v$	Peso molecular del agua (kg/kmol)
PP	Variación de peso (%)
$P_s$	Presión de saturación del aire en contacto con el producto (atm)
$\bar{P}_{s\infty}$	Presión de saturación fuera de la capa limite (atm)
q	Flujo específico de calor por unidad de área (kJ/kg m <sup>2</sup> )

$Q_s$	Calor isostérico de sorción (kJ/kmol)
$R$	Radio del cilindro (m)
$r$	Eje radial (m)
$\mathcal{R}$	Constante de los gases perfectos (atm m <sup>3</sup> /kmol K)
$Ra$	Numero adimensional de Rayleigh
$Re$	Numero adimensional de Reynolds
RMSE	Raíz cuadrada del error cuadrático medio
$Sc$	Numero adimensional de Schmidt
$Sh$	Numero de se Sherwood
$T$	Temperatura (°C, K)
$T_p$	Temperatura película $(T_\infty + T_s)/2$ (°C, K)
$T_0$	Temperatura inicial (°C, K)
$t$	Tiempo (s)
$T_\infty$	Temperatura del aire (K)
$t_c$	Tiempo total del proceso de secado continuo (s)
$T_H$	Temperatura del aire durante el periodo de calentamiento (°C)
$t_H$	Tiempo de calentamiento (s)
$t_I$	Tiempo de calentamiento efectivo (s)
$t_p$	Tiempo total del proceso de secado intermitente (s)
$T_R$	Temperatura del aire durante el reposo (°C)
$t_R$	Tiempo de reposo (s)
$T_s$	Temperatura en la superficie (K)
$V_\infty$	Velocidad del aire (m/s)
VAR	Varianza explicada
$W$	Humedad en base seca (kg/kg)
$W_0$	Humedad inicial (kg/kg)
$W_e$	Humedad de equilibrio (kg/kg)
$W_f$	Humedad final del producto (kg/kg)
$W_m$	Humedad de la monocapa (kg/kg)
$\overline{W}$	Humedad media (kg/kg)
$x$	Eje longitudinal (m)
$Z$	Valor de una propiedad
$\tau$	Constante de ponderación del tiempo total de secado
$\varphi$	Humedad relativa del aire en contacto con el producto
$\lambda$	Calor latente de vaporización (kJ/kg)
$\rho_{ss}$	Densidad del sólido seco (kg/m <sup>3</sup> )
$\varphi_\infty$	Humedad relativa fuera de la capa límite