

SIMULACION DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR Y DE MASA
EN PROCESOS DE SECADO CON CAMBIO DE VOLUMEN.

R. ABALONE^{**}, M. A. LARA^{*} Y R. D. PIACENTINI^{*}

RESUMEN:

En el presente trabajo se presentan los datos experimentales del secado de productos biológicos homogéneos y de simetría esférica, en particular patata. Se dan además los resultados de la modelización matemática de la transferencia simultánea de calor y materia en condiciones externas controladas considerando la contracción volumétrica del producto, empleando las ecuaciones diferenciales acopladas desarrolladas por Luikov [1].

La comparación entre las mediciones realizadas y los resultados obtenidos da un buen acuerdo en los distintos rangos de secado. El presente estudio permite la identificación de parámetros característicos del sistema.

INTRODUCCION:

El secado es una de las técnicas más empleadas para la conservación de productos biológicos de alto contenido de humedad. El empleo de energía solar para calentar el aire de secado y reducir consecuentemente su humedad relativa es particularmente apropiado, dado que el valor máximo de la temperatura del aire, en zonas de clima templado-cálido, no supera usualmente, los 60-70 °C.

El análisis de los procesos físicos puede realizarse mediante modelos puramente difusivos [2] o de transferencia de calor y masa acoplados. Los primeros han sido ampliamente empleados, pero describen el proceso en forma limitada, concentrándose solamente en la disminución del contenido de agua, sin dar información sobre la evolución de la temperatura interior. Los modelos acoplados [1] describen en forma más detallada los procesos de secado y por lo tanto permiten obtener mayor información.

Este trabajo es continuación de los desarrollados por el Grupo de Energía Solar (IFIR) y por otros autores [3,4,5,6], en relación con el secado de productos biológicos de alto contenido de humedad y en condiciones de temperatura del aire ingresante constante o variable, simulando un secado solar.

Fac. de Cs. Ex., Ing. y Agrimensura (U.N.R.).
Pellegrini 250. (2000) Rosario.

Consejo de Investigaciones de U.N.R.

* Instituto de Física Rosario (CONICET - UNRosario)
27 de Febrero 250 bis. (2000) Rosario.

EXPERIMENTACION:

Se realizaron experiencias de laboratorio de simulación de condiciones de temperatura y humedad relativa del aire de secado controladas. En forma práctica, estas condiciones se consiguen precalentando el aire con energía solar y complementando con energía convencional termostatzada.

Se registraron: la evolución temporal de la temperatura y del contenido de humedad en el secado de patata (variedad Mar del Plata).

Se probaron diferentes diámetros, formas de preparación, condiciones ambientales (temperatura y humedad del aire de secado), entre otros. Las condiciones para la experiencia definitiva fueron:

- * muestras de patata de forma esférica: 30mm de diámetro.
- * temperatura del aire de secado: 60 C.
- * humedad relativa del aire de secado: 33 %.

La experiencia y el equipo utilizado fueron descriptos en forma detallada en trabajos anteriores [7,8], por lo que se darán a continuación sólo los detalles más significativos:

El aire de secado se calienta con una lámpara de 200W, cuyo encendido y apagado se controla mediante un regulador proporcional que sensa la temperatura a través de una termocupla tipo T, norma NBS. La humedad relativa del aire se mantiene constante mediante una solución saturada de cloruro de magnesio.

Las patatas se seleccionaron con la menor cantidad posible de irregularidades y ningún defecto (brotes, golpes, etc.). Se pelaron mecánicamente, dándoles forma esférica y luego se pesaron. Se distribuyeron uniformemente en la bandeja de ensayo, empleándose una para sensar la pérdida global de agua en forma automática, mediante un captor de desplazamiento LVDT y otra para sensar la evolución de la temperatura en función del radio mediante 5 termocuplas. El resto de las muestras se utilizó para determinar la variación radial del contenido de humedad, seccionándolas en tres partes: sec 1: entre el centro ($rad=0$ m) y $rad=0.004$ m, sec 2: entre $rad=0.004$ m y $rad=0.008$ m y sec 3: entre $rad=0.008$ m y $rad=0.015$ m. Estos valores son iniciales.

La termocupla del regulador, la salida del LVDT y todas las demás termocuplas fueron conectadas a un equipo de adquisición de datos (FLUKE 2285), conectadas en línea a una PC, recibiendo datos y controlando el experimento a tiempo real.

El valor medio de la temperatura se calculó como la media aritmética de las lecturas de las termocuplas y el valor promedio del contenido de humedad se determinó a partir de los valores medidos del peso de la muestra.

MODELO TEORICO:

El proceso de transferencia simultánea de masa y energía en medios porosos puede describirse mediante las ecuaciones desarrolladas por Luikov [1], que tienen en cuenta la variación simultánea de la temperatura y el contenido de humedad en forma acoplada.

Si se admite que la temperatura θ y el contenido de humedad W son

funciones parabólicas del radio r del producto de forma esférica (hipótesis justificada para productos homogéneos y sin carozo central por Lara, Abalone, Piacentini y Gaspar [8]) las ecuaciones diferenciales en función de los valores medios de W y θ resultan, para radio variable [6]:

$$\frac{d}{dt}(\bar{W}(t)) = \frac{-3 \alpha_m}{R(t) \rho_a} \Delta p + A(t) \frac{dR(t)}{dt} \quad (1.a)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\bar{\theta}(t)) = \frac{15 a}{R(t)} \left[\frac{\alpha(\bar{\theta}_A - \bar{\theta})}{5\lambda + \alpha R(t)} - \alpha_m L \Delta p \left(\frac{1 - \epsilon}{5\lambda + \alpha R(t)} + \frac{\epsilon}{5a C \rho_a} \right) \right] + \\ + 3 B(t) \frac{dR(t)}{dt} \end{aligned} \quad (1.b)$$

donde:

$$A(t) = - \frac{3}{5} \frac{\alpha_m \Delta p}{a_m \rho_a} \quad B(t) = \frac{\alpha(\bar{\theta}_A - \bar{\theta}) - \alpha L (1 - \epsilon) \Delta p}{5\lambda + \alpha R(t)}$$

$$R(t) = \left[\frac{3 m_a}{4\pi \rho_a} \left(1 + \frac{\rho_a}{\rho_1} \bar{W} \right) \right]^{1/3} \quad (2)$$

con las siguientes condiciones iniciales:

$$\bar{W}(t=0) = \bar{W}_i \quad \text{y} \quad \bar{\theta}(t=0) = \bar{\theta}_i \quad (3)$$

En (1), $\Delta p = d_v(W_a) F(\theta_a) - f(\bar{\theta}_A)$ es la diferencia de presión de vapor entre la superficie del producto y el aire de secado, siendo $f(\bar{\theta}_A) = H_r F(\bar{\theta}_A)$ la presión parcial de vapor a la temperatura $\bar{\theta}_A$.

En este esquema teórico se considera solo la contracción global de la muestra. Un modelo más exacto incluiría, a partir de un determinado tiempo, la aparición de una cavidad interna de radio variable, lo cual se observa experimentalmente cuando el contenido de agua se reduce considerablemente. Sin embargo, en el presente trabajo se tiene en cuenta un tiempo final inferior al correspondiente al comienzo de la formación del hueco.

Las Ecs. (1.a) y (1.b) constituyen un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales acopladas. Su solución puede obtenerse de varias maneras, previo conocimiento de los parámetros y funciones que intervienen. En su mayor parte fueron extraídos de la bibliografía correspondiente o medidos experimentalmente, como el radio inicial R_i y las temperatura y humedad relativa del aire de secado. Las indeterminaciones más significativas de ciertos parámetros y funciones (ver ítem siguiente), se dan en relación con la transferencia de energía, la cual está en general muy poco analizada en la bibliografía. Se ajustaron dichos parámetros y funciones mediante la técnica de variación de los más significativos en

un amplio rango de valores.

El sistema de ecuaciones diferenciales acopladas planteado fue resuelto mediante la técnica propuesta por Burlish-Stoer, que utiliza la extrapolación de Richardson [9].

Las figuras 1 y 2 muestran la variación en función del tiempo de secado del contenido de humedad y de la temperatura, respectivamente. La figura 3 muestra la variación del radio en función del tiempo de secado. Se representan los valores medidos y los obtenidos mediante la simulación.

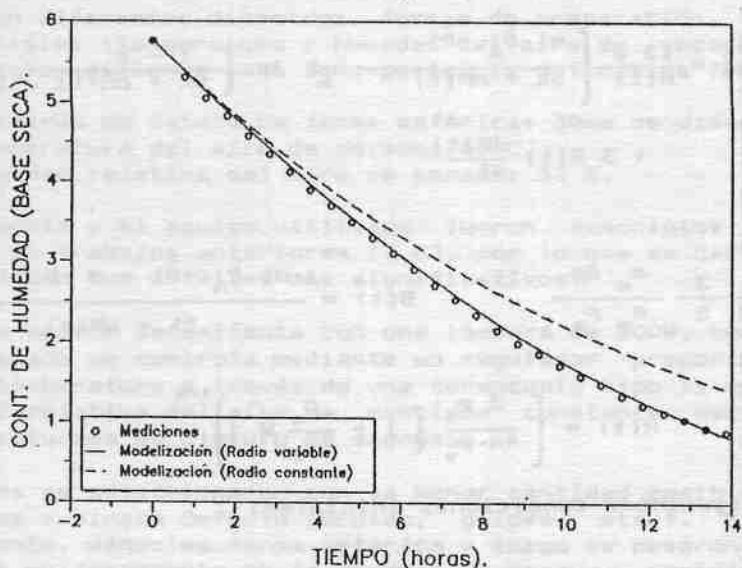


FIG.1: Comparación de valores medidos y calculados del contenido de humedad medio de la muestra considerando radio constante y variable.

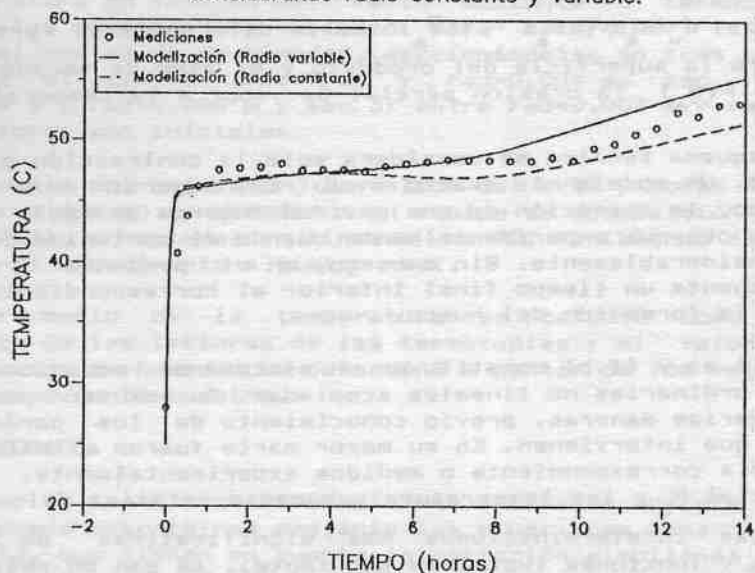


FIG.2: Comparación de valores medidos y calculados de la temperatura media de la muestra considerando radio constante y variable.

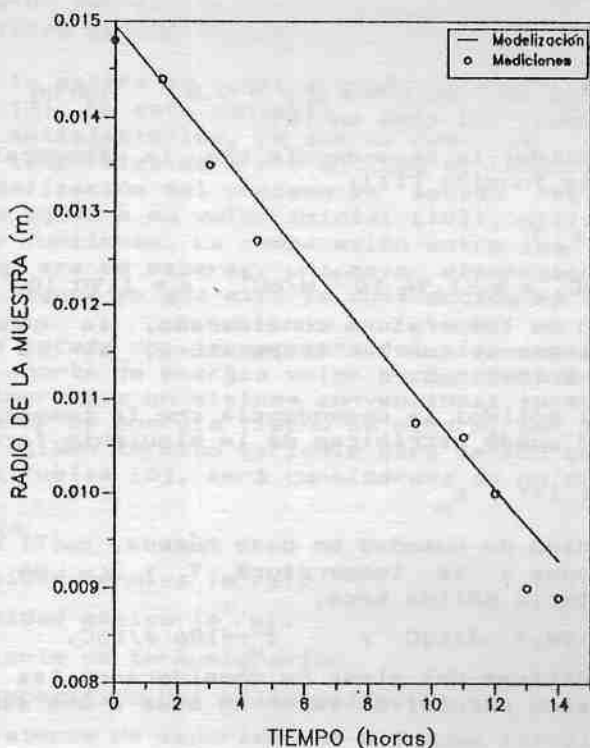


FIG.3: Variación del radio de la muestra en función del tiempo.

PARAMETROS Y FUNCIONES REQUERIDAS.

Contenido de humedad inicial del producto: $\bar{w}_l = 5.7$

Temperatura inicial del producto: $\bar{\theta}_l = 25$ C.

Calor latente de vaporización del agua: $L = 2.26 \cdot 10^6$ J/Kg.

Humedad relativa del aire: $H_r = 0.33$

Temperatura media del aire: $\bar{\theta}_A = 60$ C.

Difusividad termica del sólido: $a = \lambda / C \cdot \rho$

Temperatura de la superficie [3]: $\theta_s = (\bar{\theta} + \bar{\theta}_A) / 2$.

Coefficiente de vinculación: $\varepsilon = 1 - \frac{1}{e^{0.01 \cdot \alpha l - \theta_s} + 1}$

Actividad del agua: De acuerdo a las curvas de sorción para patatas dadas en [2], para el rango de contenidos de agua considerados en el presente trabajo puede aproximarse, con error menor al 5% a:

$$d_v = 1$$

Coefficiente de transferencia de calor por convección: se supone constante y su valor se ajusta con los datos experimentales.

$$\alpha = 60 \cdot 10^4 \text{ J/hm}^2\text{C}$$

Coefficiente de transferencia de masa-aire [3]: se propone la siguiente dependencia con el contenido de humedad:

$$\alpha_m = \beta W^\gamma$$

Los parámetros $\beta = 3.6 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^2\text{hPa}$ y $\gamma = 0.8$ fueron ajustados con los valores medidos, tal como en [6].

Conductividad del sólido: la dependencia con la temperatura está dada por la siguiente función [11]:

$$\lambda = a_1 + a_2 T + a_3 T^2$$

donde: $a_1 = 1.05 \text{ W/mC}$, $a_2 = -1.96 \cdot 10^{-2} \text{ W/mC}^2$, $a_3 = 1.90 \cdot 10^{-4} \text{ W/mC}^3$.

Dado que en el rango de temperatura considerado, la conductividad no varía significativamente con la temperatura, se la consideró constante e igual a 2075 J/hmC .

Calor específico del sólido: la dependencia con la temperatura y el contenido de humedad puede escribirse de la siguiente forma [11]:

$$c = Y c_v(T) + (1+Y) c_m$$

donde Y es el contenido de humedad en base húmeda, $c_v(T)$ es el calor específico del agua a la temperatura T y c_m es el calor específico de la materia sólida seca.

En este caso: $c_m = 1104.4 \text{ J/kgC}$ y $c_v = 4186 \text{ J/kgC}$.

Propiedades psicrométricas del aire: Se consideraron las funciones empíricas de la presión parcial de vapor de agua a una dada temperatura según [12].

Difusividad másicas: Ecuación de tipo Arrhenius:

$$a_m = A \exp \left(- E_a / R_o T_A \right)$$

donde $A = 10 \text{ m}^2/\text{h}$ es una constante, $E_a = 100 \text{ KJ/mol}$ es la energía de activación para la transferencia de masa, $R_o = 8.3 \text{ KJ/mol K}$ es la constante universal de los gases y T_A es la temperatura absoluta del aire de secado.

ANÁLISIS Y CONCLUSIONES

En este trabajo se presentan resultados experimentales y de modelización teórica, del secado de productos biológicos homogéneos de alto contenido de humedad. Se ha elegido la patata por cumplir con estas condiciones y ser de fácil disponibilidad. Además, se le puede dar forma esférica y seccionar fácilmente en casquetes esféricos para determinar los contenidos parciales de humedad.

Se adoptaron parámetros y funciones conocidos de la bibliografía especializada y se han identificado otros (ϵ , α , α_m , a_m , d_v). Es de destacar la gran necesidad de disponer de estas cantidades, para una simulación más apropiada que incluya no solamente parámetros másicos sino también parámetros térmicos.

La comparación de las curvas teóricas de \bar{W} y $\bar{\theta}$ con los datos experimentales mostrada en las figuras 1 y 2, permite constatar el buen acuerdo entre ambos resultados. La máximas desviaciones son: 5 % para el contenido de humedad y de 1.6 % para la temperatura a las horas iniciales del secado. En este último caso se ha considerado a la temperatura en Kelvin y es evidente que el intervalo de tiempo

donde hay mayor desviación sea el inicial, ya que allí la variación de esta cantidad es muy brusca.

El radio de la esfera se consideró variable con la relación funcional dada en (3). En este contexto, los resultados obtenidos son ampliamente satisfactorios, ya que se describen adecuadamente las evoluciones temporales de \bar{w} y $\bar{\theta}$ en todo el rango considerado, mejorando la modelización del proceso de secado realizada con radio constante (e igual a su valor inicial [10]), utilizando los mismos parámetros y funciones. La comparación entre las dos simulaciones muestra, como era de esperar, una mayor discrepancia en la última parte de la figura ya que allí la contracción es significativa.

Este tipo de secado con temperatura del aire constante, puede realizarse con aporte de energía solar para precalentar el aire de secado que ingresa a un sistema convencional termostatzado o bien a un acumulador de energía (lecho de piedra, por ejemplo). La situación en régimen térmico variable para secado de patata, como en el caso de ciruelas [3], será considerada en un próximo trabajo.

NOMENCLATURA:

- a difusividad térmica (m^2/s).
- a_m difusividad másica (m^2/s).
- δ coeficiente de termomigración.
- C calor específico del sólido (J/KgC).
- L calor latente de vaporización del agua (J/Kg).
- H_r humedad relativa del aire.
- λ conductividad térmica del sólido (W/mC).
- ρ_s, ρ_l densidades del sólido y del agua (Kg/m^3).
- α coeficiente de transferencia de calor sólido-aire (W/m^2C).
- α_m coeficiente de transferencia de masa sólido-aire (W/m^2C).
- e coeficiente de vinculación.
- d_v actividad del agua.
- F presión de vapor saturado (Pa).
- $\bar{\theta}_A$ temperatura media del aire (C).
- $\bar{\theta}_s, \bar{\theta}_i$ temperaturas de la superficie ($r=R(t)$) e inicial (C).
- \bar{w}_s, \bar{w}_i humedades de la superficie e inicial.
- Δp diferencia de presión (Pa).
- $f(\bar{\theta}_A)$ presión parcial de vapor a la temperatura $\bar{\theta}_A$ (Pa).

RECORDATORIO:

Los autores desean dedicar este trabajo al Lic. Roberto Gaspar, quien fuera en vida un excelente investigador, gran compañero y destacado docente.

REFERENCIAS:

- [1] Luikov A.V. "System of differential equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies". Int. Heat-Mass Transfer, 18, 1-14, 1975.
- [2] Kneule, F. "El Secado". URMD S.A. de Ediciones, 1976.
- [3] Piacentini, R.D. y Combarous, M.. " Modelisation du Sechage Solaire de Fruits. Application au séchage de prunes". Revue Internationale d'Helio-technique. COMPLES, 2ème semestre 1977, 44-49.
- [4] Bertin, R., Pierrone, F. y Combarous, M.. "Détermination des paramètres de séchage de certains fruits compacts". Ann. Technol. Agric., 27, 489-500, 1978.
- [5] Weitz, D.A., Luque, E.A. y Piacentini, R.D. "Solar Drying Simulation of Prunes Arranged in Thin Layers". Drying Technology, 8, 287-303, 1990.
- [6] Pieronne, F. "Modelisation et identification d'un processus de séchage". Thèse de docteur du 3ème cycle, Université de Bordeaux I, 1977.
- [7] Abalone, R., Lara, M.A. y Gaspar, R. "Secado de papa bajo condiciones constantes de aire. Métodos de ensayo y esquema teórico". IFIR Tech. Report 1/92, 1992.
- [8] Lara, M.A., Abalone, R., Piacentini, R. y Gaspar, R. "Transferencia de calor y de masa en secado de papa bajo flujo de aire". IV CONGRESO LATINOAMERICANO DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y MATERIA Y X JORNADAS (CHILENAS) DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y MATERIA. 28-31 de Octubre de 1991. La Serena. Chile.
- [9] Press, W.H., Flannery, B.P., Teukolsky y S.A., Vetterling, W.T. " Numerical Recipes. The Art of Scientific Computing". Cambridge University Press 1986.
- [10] Abalone, R., Lara, M.A. y Piacentini, R.. "Simulación de Transferencia de Calor y de Masa, bajo condiciones controladas". Aceptado para su presentación en VII SEMINARIO NACIONAL DE ENERGIA SOLAR Y EOLICA. SENESE VII a realizarse los días 25-27 de Noviembre de 1992 en Valparaíso, Chile. A ser publicado en las actas correspondientes.
- [11] Califano, A.N. y Calvelo, A. "Thermal Conductivity of Potato between 50 and 100 C". Journal of Food Science, 56, 586, 1991.
- [12] ASHRAE HANDBOOK & PRODUCT DIRECTORY. "Fundamentals", ASHRAE Ed., 1977.