

MODELIZACION DEL SECADO SOLAR DE FRUTOS.
APLICACION AL SECADO DE CIRUELAS.

Piacentini (x), S.B. Concari (x) y M. Combarneous (xx).
Grupo Energía Solar, Dpto. de Física, Facultad de Ciencias
Exactas e Ingeniería (UNR), Pellegrini 250
Rosario, Argentina.
Laboratoire de Mécanique Physique, Université de
Toulouse I 33405 Talence, Francia.

Este presente trabajo consiste en el desarrollo de un modelo matemático que describe el secado solar de frutos. El modelo se fundamenta en las ecuaciones que dan la transferencia de calor y masa en cuerpos porosos. Las temperaturas y contenidos de agua promedios en el interior del fruto se calculan en función del tiempo. Como caso particular se considera el secado de ciruelas, empleando colectores solares que funcionan como recipientes cuyo interior se ubican los frutos o como precalentadores de los recipientes.

This work deals with a model for fruit drying by solar energy. The model is derived from the equations for heat and mass transfer in porous media. Average temperature and water content in the fruit have been computed versus time. In particular, plums have been considered using solar collectors which work as fruit containers or used as air preheaters of the containers.

Introducción

Secado de frutos por exposición directa a la radiación so-

lar es una técnica corrientemente usada en países de clima relativamente cálidos y secos. En regiones con alta humedad relativa ambiente, se supone generalmente, que el secado solar no es adecuado. En lo que sigue, se verá que, aún en ese caso, pueden usarse sistemas simples que optimicen la colección de energía solar, en procesos de secado solar. El modelo describe la evolución en el tiempo de los valores medios de la temperatura \bar{z} y del contenido de agua \bar{w} de los frutos, sometidos a condiciones iniciales y externas. Los frutos a secar se suponen dispuestos para secarse en un sistema, por donde circula el aire ambiente. El colector solar puede ser incluido en la estructura del recinto, como colector integrado, o ser utilizado como dispositivo de precalentamiento para la circulación del aire. Una combinación de ambas posibilidades puede ser también considerada.

Modelo Matemático

a) De los frutos

La simulación teórica está basada en el análisis de la transferencia de calor y de masa dentro del fruto, así como en la interfase entre el fruto y el aire.

Las transferencias dentro del fruto, son descritas por el sistema de ecuaciones de conservación formulado por Luikov [1]. En el caso de medios homogéneos de forma esférica y con simetría esférica en las condiciones iniciales y de borde, las evoluciones de la temperatura local z y el contenido de agua w , con las notaciones listadas al final, son descritas por

$$\partial(rz)/\partial t = a \partial^2(rz)/\partial r^2 + \epsilon l c \partial(rw)/\partial r \quad (1)$$

$$\partial(rw)/\partial t = a_m \partial^2(rw)/\partial r^2 + a_m \delta \partial^2(rz)/\partial r^2 \quad (2)$$

Las condiciones iniciales y las condiciones de borde cerca del carozo ($r = R_0$) y la interfase fruto-aire son

$$\text{para } t=0 \quad z=z_i \quad r \in \{0, R\} \quad (3)$$

$$w = w_i \quad r \in \{R_0, R\} \quad (4)$$

$$t > 0 \quad \partial z / \partial r = 0 \quad \text{en } r = 0 \quad (5)$$

$$\partial w / \partial r = 0 \quad \text{en } r = R_0 \quad (6)$$

$$\lambda \partial z / \partial r = \alpha (\bar{\theta} - z) - \alpha_m L (1 - \varepsilon) \left\{ d_w F(z) - f(\bar{\theta}) \right\} + g' \quad (7)$$

$$\alpha_m \rho_s \partial w / \partial r + \alpha_m \rho_s \int \partial z / \partial r = \alpha_m \left\{ d_w F(z) - f(\bar{\theta}) \right\} \quad (8)$$

donde $g' = 0,25 K_{tr} \cdot \varepsilon \cdot E$ es la contribución correspondiente al flujo solar directo.

Considerando, como primera aproximación, que z y w pueden representarse por funciones parabólicas de la variable de espacio r , las ecuaciones (1) y (2) pueden simplificarse del modo detallado por Babukha y Schraiber (2) y generalizadas por Piacentini y Combarous (3) para tener en cuenta en el balance general de calor, el flujo de radiación directo sobre el fruto. Por lo tanto se deriva un sistema de ecuaciones, cuyas soluciones son los valores medios de la temperatura y contenido de agua del fruto, respectivamente \bar{z} y \bar{w} .

$$\partial \bar{z} / \partial t = \frac{5\alpha}{5\lambda + \alpha R} \left\{ \frac{3\alpha}{R} (\bar{\theta} - \bar{z}) + L \rho_s \partial \bar{w} / \partial t \right\} + \frac{3g'}{\rho_s (c_s + \bar{w} c_e) R} \quad (9)$$

$$\partial \bar{w} / \partial t = - \frac{3\alpha_m}{\rho_s R} F(\bar{z}') (d_w - H) \quad (10)$$

Al derivar (9) y (10), tomando valores medios en (1) y (2), como se ha probado que la influencia del cambio de fase es despreciable, ε ha sido elegido igual a cero en las ecuacio-

nes (1) y (7).

b) Del aire exterior a los frutos

Si el colector solar es utilizado como sistema de precalentamiento para la circulación del aire y los frutos se encuentran en un recinto cerrado relativamente aislado, puede describirse la temperatura del aire que rodea al fruto como

$$\theta = \theta_i + \frac{Q_u}{\dot{m} c_p}$$

es decir, que obtenida una ganancia útil a partir de una radiación incidente y una determinada aislación del sistema, es posible aumentar la temperatura reduciendo suficientemente el flujo de aire. En el secado de frutos se pretende disminuir considerablemente su contenido de agua, por los que son necesarias temperaturas relativamente altas (40° a 70°C) respecto de la ambiente.

Si se analiza, por el contrario, un sistema integrado en el cual el recinto que contiene los frutos actúa al mismo tiempo como colector solar [4], [5], puede obtenerse la temperatura del aire en el interior del mismo, a partir de la ecuación de conservación de energía

$$W \frac{\partial \theta}{\partial t} = k_{tr} E - (U^{\uparrow} S^{\uparrow} + U_{\downarrow} S_{\downarrow}) (\theta - \theta_a)$$

a partir de la cual

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = h - k \theta$$

donde se ha introducido

$$h = \frac{k_{tr} E}{W} + \frac{U^{\uparrow} S^{\uparrow} + U_{\downarrow} S_{\downarrow}}{W} \cdot \theta_a$$

y

$$k = \frac{U^{\uparrow} S^{\uparrow} + U_{\downarrow} S_{\downarrow}}{W}$$

La ecuación de (13) conduce a

$$\theta = \left\{ A + \int_0^t h e^{-kt} dt \right\} e^{-kt} \quad (16)$$

Donde A es una constante determinada por las condiciones iniciales y h depende del tiempo. La constante K es proporcional a las pérdidas de energía del sistema.

Suponiendo que la radiación solar incidente y la temperatura ambiente puedan representarse mediante funciones senoidales con iguales períodos, resulta

$$h = B \operatorname{sen} bt \quad (17)$$

Donde B se deduce de (14) y b es el período. Esta representación es una la. aproximación a un día claro o uniformemente nublado. La temperatura del aire exterior a los frutos resulta entonces, de (16),

$$\theta = e^{-kt} \left\{ \theta_i + \frac{B}{k^2 + b^2} (b - b e^{-kt} - k \operatorname{sen} bt - b \operatorname{cos} bt) \right\} \quad (18)$$

Secado solar de ciruelas

Las ecuaciones (9) y (10) han sido aplicadas al caso particular del secado solar de ciruelas, producidas en un período del año de clima húmedo y moderadamente cálido. La energía solar incidente por unidad de área y de tiempo, puede representarse por

$$E = \bar{E}_{m_x} \operatorname{sen} (\pi t / p) \quad (19)$$

que corresponde a días claros o uniformemente nublados. Cuando los valores del orden de b y $B \approx 10^3 k$, lo cual corresponde a condiciones de aire típicos, θ en la expresión (18) sigue una la. aproximadamente senoidal con un máximo desplazado respecto del correspondiente a la radiación solar. Por consiguiente, la temperatura media del aire se propone como

$$\bar{\theta} = \bar{\theta}_{m_n} + (\bar{\theta}_{m_x} - \bar{\theta}_{m_n}) \operatorname{sen} (\pi t / p) \quad (20)$$

Suponiendo que durante el período de secado el contenido de agua en la atmósfera exterior al sistema es constante, la humedad relativa de la fase gaseosa circulante a través del sistema es tal que

$$H F(\bar{z}') = \left\{ H F(\bar{z}') \right\}_{t=0} \quad (21)$$

Por otra parte, si la circulación del aire es por convección natural, el coeficiente de transferencia de calor puede expresarse como

$$\alpha = \alpha_L + \Delta \alpha \operatorname{sen}(\pi z/q) \quad (22)$$

Para el caso específico considerado en este trabajo, los coeficientes de transferencia de masa y de absorción-desorción han sido elegidos como /6/

$$\alpha_m = \beta \bar{W}^{\delta} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} d_w &= \zeta \bar{W} + \eta & \bar{W} < 1,3 \\ &= 1 & \bar{W} \geq 1,3 \end{aligned} \quad (24)$$

Resultados y Discusiones

Las ecuaciones diferenciales acopladas (9) y (10) se ha resuelto numéricamente con el método desarrollado por Bulirsh y Stoer /7/. Este método de alta precisión emplea alrededor de 3 segundos con una computadora IRIS 80, para obtener \bar{z} y \bar{w} correspondiente a un período de secado de 12 hs., con una precisión mejor que 10^{-3} .

Antes de tratar un caso real, ha sido verificado que el último término de la ecuación (9), que representa la exposición directa de los frutos a la radiación solar, es pequeño comparado con los otros términos de la misma ecuación. El predominio de estos términos es debido al significativo aumento de la temperatura y a la disminución de la humedad del aire alrededor de los frutos cuando éstos son colocados en el sistema solar.

La figura 1 muestra la sensibilidad de las evoluciones temporales de \bar{z} y \bar{w} , para varios parámetro característicos.

Las curvas de referencia han sido obtenidas considerando los valores en la tabla 1, cuando las condiciones del clima corresponden a un día claro, relativamente húmedo y cálido. Se dan también en esta figura resultados para condiciones de clima seco, siendo la humedad inicial del aire 0,3 en lugar de 0,8, con los mismos valores para todos los otros parámetros. Debe señalarse que una gran reducción de la humedad ambiente produce sólo una moderada reducción en el valor final del contenido de agua \bar{W} , confirmando la posibilidad del secado solar aún en regiones relativamente húmedas.

Las otras dos curvas, en la figura 1, son para (a) frutos con un aumento del 15% en el contenido inicial de agua y (b) una disminución del 25% en los valores de los coeficientes de transferencia de masa y calor, respecto de aquéllos considerados en la situación de referencia.

Para analizar una secuencia completa de secado solar, extendida sobre varios días, la evolución temporal del contenido de agua medio en el fruto ha sido computada para diferentes combinaciones de días claros o uniformemente nublados. Situaciones intermedias pueden interpolarse fácilmente. En la figura 2 puede verse que, considerando 0,25 como un contenido final de agua, conveniente para la conservación de las cítricos, sólo son necesarios alrededor de 1,7 días de secado con cielo claro con clima moderadamente cálido y húmedo, para una secuencia de tres días continuos uniformemente nublados seguida de un día claro, el número total de días de secado es alrededor de 3,8, lo cual es también bastante adecuado, dada las condiciones climáticas adversas que se han considerado.

Eficiencia de un sistema de secado solar

De modo general, la eficiencia de un sistema de secado solar, puede ser aproximada a través de dos parámetros característicos principales:

- La "superficie efectiva de colección" por unidad de masa de los frutos a ser secados, dada por la relación

$$S_f = L \frac{\bar{W}_i - \bar{W}^*}{L + \bar{W}_i} / \left\{ \eta_c \int_0^T E(t) dt \right\} \quad (25)$$

- La "capacidad de secado" dada como la masa de frutos a ser secada, por unidad de superficie del colector solar, a lo largo de todo el período de colección,

$$C_f = (D/J_H) S_f^{-1} \quad (26)$$

Como ejemplo, la aplicación de estas dos últimas ecuaciones a la primera secuencia de la figura 2 (todos días claros), suponiendo que

$$\eta_c = 0.5 \quad , \quad E_{m_x} = 1000 \text{ W m}^{-2} \quad \text{y} \quad D = 45 \text{ días} \quad (27)$$

da por resultado

$$S_f \approx 0.07 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1} \quad \text{y} \quad C_f \approx 360 \text{ kg m}^{-2}. \quad (28)$$

Abreviatura

difusividad térmica del fruto
capacidad calorífica
capacidad calorífica efectiva (aire - fruto)
coeficiente de absorción-desorción del fruto

presión parcial de vapor de agua en el aire
flujo solar directo sobre los frutos
flujo de masa de aire a través del colector
duración de horas de sol en un día
semiperíodo para la evolución temporal de la temperatura ambiente
variable de espacio
superficie efectiva de colección por unidad de masa de fruto
variable de tiempo
producto de la masa por la capacidad calorífica efectivas del sistema de colección

capacidad de secado del sistema solar

período de secado total, en días
energía solar por unidad de área y de tiempo
presión de vapor saturado del aire
humedad relativa, adimensional
número de días de secado para un fruto

coeficiente de transmisión a través de la cubierta transparente
calor latente de vaporización
energía absorbida por el aire
radio externo del fruto
radio del carozo del fruto
superficie del colector solar
tiempo de secado para un fruto, correspondiente a J_N días
pérdida de energía
contenido de agua en el fruto, cociente adimensional entre la masa de agua contenida en el fruto y la masa del material completamente seco

- α coeficiente de transferencia entre el aire y la superficie del fruto (α para la transferencia de calor, α_m para la transferencia de masa)
- β, δ valores constantes en la definición de α_m , ecuación (23)
- δ coeficiente de termomigración
- ε cociente adimensional de cambio de fase entre fases líquida y gaseosa
- ε_e emisividad del fruto, incluyendo un factor de forma
- η valor constante en d_w , ecuación (24)
- η_c eficiencia del colector solar
- e temperatura del aire en las vecindades del fruto
- λ coeficiente de conductividad térmica del fruto
- ξ valor constante en d_w , ecuación (24)
- ρ densidad
- z temperatura del fruto (z para la temperatura local y \bar{z} para la temperatura media)
- \bar{z}' temperatura media de la superficie del fruto; en el modelo \bar{z}' es tomado igual a $(\bar{e} + \bar{z})/2$

Sub y supraíndices:

a	ambiente	s	seco
e	agua	u	útil
i	inicial	-	valor medio
n	masa	*	final
mn	mínimo	†	superior
mx	máximo	‡	inferior

Referencias

- /1/ Luikov A.V. y Mikhailov Yu.A. - "Theory of energy and mass transfer". Pergamon Press, 1965.
- /2/ Babukha G.L. y Shraiber A.A. - "Interphase heat transfer in polydisperse gas suspension flows". Communication CT 2.5. 5th International Heat Transfer Conference, Tokyo, September 1974. "Heat Transfer 1974", 5, 69-73, J.S.M.E. - S.C.E.J., Japan, 1974.
- /3/ Piacentini R.D. y Combarnous M. - "Modélisation du séchage solaire de fruits. Application au séchage de prunes". Revue Internationale d'Héliotechnique de la

COMPLES. Under press, 1977.

4 Duffie J.A. y Beckman W. - "Solar Thermal Energy Processes", John Willey Interscience, 1974.

5 Brace Research Institute - "A Survey of Solar Agricultural Dryers" Technical Report T99, 1975.

6 Bertin R., Pierronne F. y Combarneous M. - "Modélisation et simulation du séchage des fruits en tunnel".

Industries Alimentaires et Agricoles, 93, 1431-1436, 1976.

7 Bullirch R. and Stoer J. - Numerische Math, 8, 1-13, 1966.

Tabla 1. Valores iniciales y característicos para las curvas de referencia de secado de la figura 1.

\bar{c}_1	60	$^{\circ}\text{C}$	E_{mx}	1000	w.m^{-2}
\bar{w}_1	2,8	(-)	Υ	1,16	(-)
a	$16 \cdot 10^{-8}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	η	0,48	(-)
λ	0,5	$\text{w.m}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$	ϵ_e	0,8	(-)
L	$2,47 \cdot 10^6$	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	K_{tr}	0,9	(-)
ρ_s	1400	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	p	12	horas
c_s	$0,32 \cdot 10^3$	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$	q	14	horas
α_1	209	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$	$\bar{\theta}_{\text{mz}}$	25	$^{\circ}\text{C}$
Δa	29	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$	$\bar{\theta}_{\text{mx}}$	60	$^{\circ}\text{C}$
β	$3,2 \cdot 10^{-8}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{pa}^{-1}$	H_1	0,8	(-)
ξ	0,4	(-)	-----		
			(-) variable adimensional		

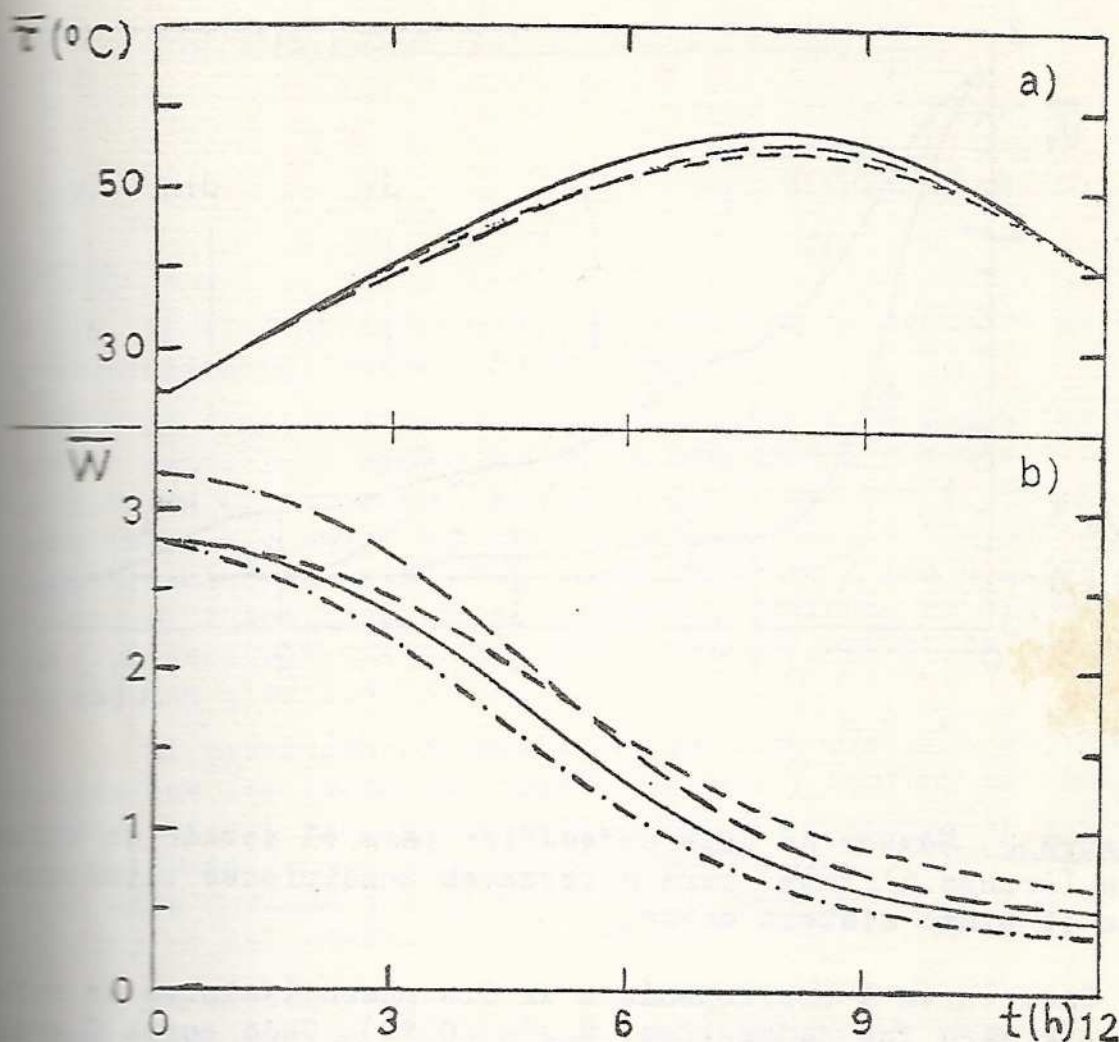


Figura 1. Influencia de los parámetros sobre las evoluciones temporales de (a) la temperatura del fruto y (b) del contenido de agua.

- curvas de referencia obtenidas con los valores dados en la tabla 1.
- disminución de la humedad del aire H_i desde 0,8 (valor de referencia) a 0,3.
- 25% de reducción de los valores de referencia de los coeficientes de transferencia α_m y α .
- 15% de aumento del contenido inicial de agua.

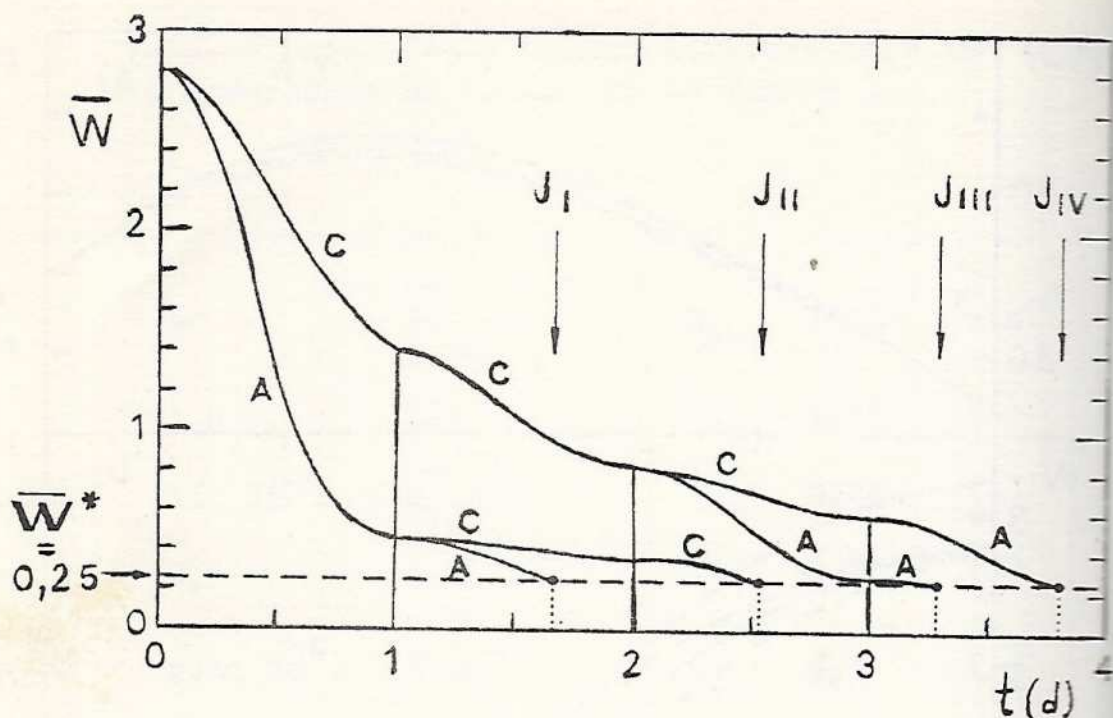


Figura 2. Número de días necesarios para el secado de ciruelas (Prunes d'Ente) para diferentes condiciones climáticas con el mismo sistema solar.

Cada curva A corresponde a un día claro (valores de referencia para los parámetros, $\bar{\theta}_{mx} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$). Cada curva C está asociada a un día uniformemente nublado ($\bar{\theta}_{mx} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ y $\Delta\alpha = 11,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$; los otros parámetros se eligen de acuerdo a la tabla 1).

Cuatro diferentes secuencias han sido estudiadas:

- | | |
|------------------------|----------------------|
| I. Secuencia A-A | $J_I = 1,67$ días |
| II. Secuencia A-C-C | $J_{II} = 2,57$ días |
| III. Secuencia C-C-A-A | $J_{III} = 3,3$ días |
| IV. Secuencia C-C-C-A | $J_{IV} = 3,8$ días |