

Editorial de la Universidad  
Tecnológica Nacional

## **Desecación de Productos Agrarios: Antecedentes Teóricos y Bibliográficos.**

**COVA, Walter J. D. – MARINELLI, Humberto E.**

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La Rioja,  
Departamento Ingeniería Electrónica.  
San Nicolás de Bari 1100 – CP(5300) La Rioja – Argentina.

**RESUMEN.** Se presenta una síntesis de aspectos teóricos referidos a la desecación de productos agrícolas en corriente de aire y se explicita el diseño conceptual de una planta de desecación controlada.

**PALABRAS CLAVE:** Conservación de productos agrícolas, teoría del secado.

### **Essication of Agricultural Products – Theoretical and Bibliographical Antecedents.**

**ABSTRACT.** A synthesis of the theoretical aspects of the essication of agricultural products in flowing air is presented together with the conceptual design of a controlled dryer.

**KEYWORDS:** Agricultural products preservation, essication theory.

### **1. INTRODUCCIÓN.**

La puesta en marcha desde la Cátedra de Proyecto Final (Dep. Ingeniería Electrónica) de la Facultad Regional La Rioja, del proyecto promocional de investigación y desarrollo código ALPRLR862 *Planta de Desecación Multipropósito: Diseño Termoelectromecánico y de Control Automático - Supervisión de su Construcción*, que se ejecuta con cofinanciación proporcionada por la Fundación Ecológica Valle de Huaco de la ciudad de La Rioja, ha significado la necesidad de proporcionar a los integrantes del proyecto, de formación predominantemente electrónica e informática, un marco referencial sobre aspectos atinentes a la teoría del secado por una parte, como asimismo una reseña de la bibliografía orientada a procesos de desecación de productos agrarios, los que conforman el objetivo principal perseguido por el proyecto.

Como consecuencia de ello se ha elaborado la presente monografía que, sin pretensiones de originalidad, compila y sintetiza las contribuciones de múltiples autores. En beneficio de la honestidad intelectual que ha de caracterizar a todo trabajo que pretenda acercar una mínima contribución al crecimiento regional y nacional, es menester en este punto brindar reconocimiento a los principales autores que han inspirado esta monografía: la tesis doctoral [36] de Irene Montero Puerta y los métodos de cálculo psicrométrico presentados en [41] por A.K. Singh et al., junto con el tratado especialmente abarcativo de P. Fito y colaboradores [20], tuvieron una acción altamente motivadora para el presente trabajo.

## 2. TEORÍA DEL SECADO.

### 2.1. Contenido de humedad.

El factor de mayor influencia en la cinética de secado, es el contenido de humedad del material. Existen diferentes métodos para medir el contenido de humedad de un producto. Los métodos indirectos utilizan la dependencia de una propiedad del producto (p.ej. su conductividad eléctrica) con el contenido de humedad, consiguiendo una medición rápida pero que requiere de un equipo muy especializado. La determinación directa del contenido de humedad implica medir la masa de producto y la masa seca correspondiente al eliminar el agua evaporable contenida en él, aplicando calor a una temperatura generalmente de 104 °C hasta alcanzar un peso constante de la muestra. Este método, aunque es el más utilizado, presenta como principal inconveniente el que al evaporar el agua se pueden eliminar, al mismo tiempo, otras sustancias volátiles del producto lo cual puede suponer errores en la obtención de dicha variable.

La cantidad de humedad presente en un material puede ser expresada en base húmeda o en base seca, e indicada como decimal o porcentaje [17], [14].

El contenido de humedad en base húmeda, definido como el peso del agua presente en el producto por unidad de peso del material sin secar, viene dado por la Ec. (1). De igual manera, el contenido de humedad en base seca, definido como el peso del agua presente en el producto por unidad de peso del material seco, se indica en la expresión (2).

$$M_{wb} = \frac{W_w}{W_0} = \frac{W_0 - W_d}{W_0} \quad (1)$$

$$M_{db} = \frac{W_w}{W_d} = \frac{W_0 - W_d}{W_d} \quad (2)$$

donde  $M_{wb}$  es la humedad en base húmeda ( $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{prod.húmedo}}$ ),  $M_{db}$  es la humedad en base seca ( $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{prod.seco}}$ ),  $W_0$  es el peso inicial de material sin secar (kg),  $W_w$  es la cantidad de agua en el producto húmedo (kg) y  $W_d$  es el peso de la materia seca en el producto (kg).

Las relaciones entre  $M_{wb}$  y  $M_{db}$  son las siguientes:

$$M_{wb} = 1 - \left( \frac{1}{M_{db} + 1} \right) \quad (3)$$

$$M_{db} = \left( \frac{1}{1 - M_{wb}} \right) - 1 \quad (4)$$

Habitualmente en ingeniería y, más concretamente, en ensayos de secado, donde el producto se va pesando de forma regular disponiendo de un registro de pérdida de peso, el contenido en humedad instantáneo para cualquier tiempo  $t$ , en base húmeda o seca, se obtiene respectivamente mediante las expresiones (5) y (6).

$$M_{t\_wb} = 1 - \left[ \frac{(1 - M_{0wb})W_0}{W_t} \right] \quad (5)$$

$$M_{t\_db} = \left[ \frac{(M_{0db} + 1)W_0}{W_t} \right] - 1 \quad (6)$$

siendo  $M_0$ , el contenido en humedad inicial en base húmeda o seca y representando  $W_t$  el peso del material en el tiempo  $t$  (kg).

## 2.2. Contenido de humedad de equilibrio. Actividad del agua. Isotermas de sorción.

El agua que contienen los productos no se encuentra incorporada en todos ellos de la misma forma: en unos casos está relativamente libre, en otros está muy ligada a la estructura del producto. Según la naturaleza de la unión entre el agua y la materia seca se distinguen [25]:

- Líquido adherente: forma una película sobre la superficie exterior de la materia seca.
- Líquido capilar: queda retenido por los intersticios de la materia porosa (superficie interna del producto).
- Líquido de hinchado: forma parte integral de la fase del producto (unión coloidal).

El concepto de actividad del agua en un material permite expresar el grado de libertad que tiene el agua contenida en él. Así, un producto intercambia agua con el ambiente que lo rodea hasta que se establece una situación de equilibrio. En estas condiciones, el valor de la humedad relativa del aire (en tanto por uno) recibe el nombre de actividad de agua del producto,  $a_w$ . De esta forma, la humedad relativa de equilibrio del aire en contacto con el agua libre es del 100 % y, por tanto, su actividad es 1.

La actividad del agua o el contenido de humedad de equilibrio están determinados por el tipo de material a tratar, su temperatura y su humedad. Así, un producto tiene una presión de vapor característica para cada temperatura y humedad contenida. Esto determina si el material adsorberá o emitirá humedad en su exposición al aire.

El contenido de humedad de equilibrio de un material higroscópico es el valor de la humedad que tiene después de haber sido expuesto, durante un largo periodo de tiempo, a unas condiciones particulares de un medio ambiente. Para ese contenido de humedad, la presión de vapor ejercida por la humedad del producto se iguala con la presión de vapor del aire circundante a su alrededor. De este modo, para la medida de la actividad del agua de un material, es necesario tener una pequeña muestra de producto en contacto con aire a una temperatura constante y con una humedad relativa controlada (p.ej. con soluciones saturadas de sales o ácidos).

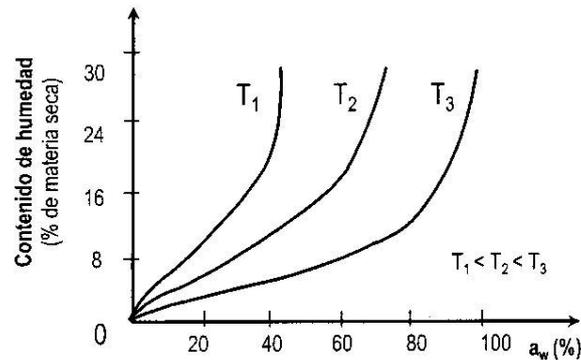
Para un valor determinado de la temperatura se puede encontrar para cada producto, experimentalmente, una correspondencia entre la actividad de agua y el contenido de humedad de equilibrio de éste. A estas relaciones se las denomina isotermas de sorción del material. Las curvas pueden representarse a partir del estado inicial húmedo del producto (proceso de desorción) o del producto seco (proceso de adsorción).

Los puntos de una curva de sorción indican para cada material, a una determinada temperatura, el contenido de humedad en el producto que se encuentra en equilibrio con aire a una humedad relativa.

Las isotermas de sorción son importantes en el análisis del comportamiento en el secado de los materiales. Aportan información sobre los contenidos de humedad que deben

alcanzarse a fin de conseguir una actividad adecuada para la conservación, almacenamiento, etc., de los productos, y además, permiten conocer cuál es el contenido de humedad mínimo que puede lograrse en un proceso donde el material se expone a una corriente de aire con una temperatura y humedad relativa determinada.

Como ejemplo, en la Fig. 1 se muestra el efecto que usualmente tiene la temperatura en las isotermas de sorción, de manera que conforme aumenta la temperatura a una determinada humedad relativa, disminuye el contenido de humedad.



**Figura 1.** Isotermas de sorción a diferentes temperaturas.

Diversos autores han presentado para diferentes productos estas relaciones con la temperatura: véase [03], [04], [05], [10], [11], [14], [15], [17], [29], [31], [32], [33], [37], [38], [39], [40], [42].

### 2.3. Calor latente de vaporización.

El requerimiento térmico para secar un producto se denomina calor latente de vaporización,  $L_v$ , y representa la cantidad de energía que tiene que absorber el producto para vaporizar su humedad.

En el agua libre, este valor depende exclusivamente de la temperatura y es del orden de los 2450 kJ/kg a 20 °C. Su valor en función de la temperatura se puede determinar mediante la expresión (7) [21],

$$L_w = \frac{R}{M_w} [6547.1 - 4.23(T + 273.16)] \quad (7)$$

siendo  $L_w$  el calor latente de vaporización del agua pura (J/kg),  $R$  la constante de los gases (8314 J/kmol K),  $M_w$  el peso molecular del agua (18,01 kg/kmol), y  $T$  la temperatura (°C).

Si el agua no está libre como ocurre habitualmente, el calor latente de vaporización es mayor y los factores de los que depende son el tipo de producto, su humedad y la temperatura. De esta manera, conforme aumenta el contenido de humedad y la temperatura, menor es el calor latente de vaporización necesario. La variación de este parámetro con la temperatura y el contenido de humedad ha sido estudiada por diversos autores para diferentes materiales [06], [07], [14], [17], [21].

Por otro lado, si el ambiente en el que se encuentra el producto tiene una humedad relativa mayor que la actividad de agua que le corresponde a su contenido de humedad, éste absorbe humedad. Por lo tanto, para secar el material no es suficiente con suministrar calor sino que es necesario que la humedad relativa del ambiente en el que se encuentra sea lo suficientemente baja.

## 2.4. Ratios de secado.

### 2.4.1. Curvas de secado de un producto.

En general, el proceso de secado se caracteriza por tres fases (Fig. 2) [25]:

**1a Fase:** Periodo de velocidad de secado creciente.- Corto periodo transitorio (habitualmente despreciable) en el que se produce un calentamiento inicial del producto y la velocidad de secado aumenta.

**2a Fase:** Periodo de velocidad de secado constante.- El secado tiene lugar sólo en la superficie, produciéndose exclusivamente la evaporación de la humedad superficial. La extracción de humedad en este periodo depende principalmente de las condiciones del aire circundante y prácticamente es independiente de la naturaleza del producto. El movimiento del agua en el material es lo suficientemente rápido como para mantener las condiciones de saturación en la superficie, de manera que durante todo el intervalo el producto se encuentra saturado de humedad a una temperatura prácticamente constante y aproximadamente igual a la temperatura de bulbo húmedo. El proceso es similar a la evaporación de un líquido. (En los materiales no higroscópicos todo el proceso de secado tiene lugar en el régimen de secado constante).

**3a Fase:** Periodo de velocidad de secado decreciente.- Comienza al finalizar el periodo constante (contenido de humedad crítico del producto). La resistencia interna del material se hace más importante, dificultando el paso de humedad; ya no existen condiciones de saturación en la superficie y se produce la eliminación de la humedad interna. Este periodo depende fundamentalmente de la difusión de humedad del interior del producto hacia la superficie, así como de la evaporación superficial. A su vez, está dividido en dos estados [17], un primer periodo decreciente, en el que tiene lugar el secado de la superficie no saturada, y un segundo periodo decreciente en el que la difusión de humedad a la superficie se hace más lenta y es el factor determinante. En general, la duración de estos regímenes depende del contenido de humedad inicial del material.

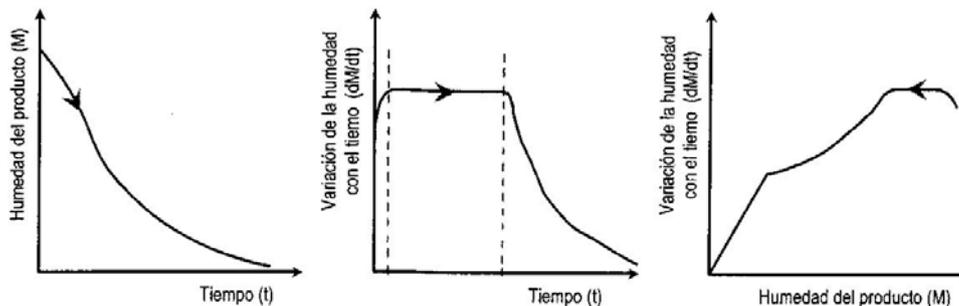


Figura 2. Curvas de secado.

Los productos agrícolas difieren de otros materiales frecuentemente secados (textil, piedra, papel, etc), conocidos estos últimos como no higroscópicos. Los materiales no higroscópicos se caracterizan por tener la humedad ligeramente retenida en su interior, de forma que se considera “desligada” del producto y por tanto, es posible secarlos hasta valores de contenido de humedad iguales a cero.

Sin embargo, en los materiales agrícolas (higroscópicos) la humedad contenida está usualmente “atrapada” en pequeños capilares cerrados, siendo imposible llegar hasta valores de humedad iguales a cero y por tanto, siempre existe un contenido de humedad residual.

Cuando un producto es calentado con contenido de humedad constante, su presión del vapor aumenta, dando lugar a un movimiento de humedad hacia el ambiente que se encuentra a una presión de vapor inferior. El ratio de humedad es sólo aproximadamente proporcional a la diferencia de presiones de vapor entre el producto y el ambiente, ya que existe una resistencia del material al flujo de humedad.

De esta forma, se puede hablar para los productos agrícolas, en general, de dos regímenes de secado: el periodo de velocidad de secado constante y el periodo de velocidad de secado decreciente [09]. Sin embargo, dependiendo del tipo de producto y del proceso de secado, en ocasiones no existe periodo de velocidad de secado constante [01], [22], [24], [26], [45]. Por tanto, resulta fundamental realizar ensayos experimentales de secado para cada tipo de producto, mediante el registro de peso a diferentes intervalos, para poder establecer de manera correcta sus curvas de secado.

#### 2.4.2. Ratio de humedad.

El ratio de humedad,  $MR$ , se expresa generalmente según la Ec. (8),

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (8)$$

donde  $MR$  es el ratio de humedad (en fracción o %),  $M_t$  el contenido de humedad en cada instante (kg),  $M_0$  el contenido de humedad inicial (kg) y  $M_e$  el contenido de humedad de equilibrio (kg).

Sin embargo, es habitual en las aplicaciones de secado despreciar el contenido de humedad de equilibrio, ya que la humedad relativa del aire fluctúa continuamente durante el proceso [44] siendo  $M_e$  un parámetro difícil de determinar. De esta manera, el ratio de humedad que se utiliza comúnmente es el dado en la expresión (9).

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (9)$$

#### 2.4.3. Ratio de secado.

Como ya se ha indicado, cuando el material que debe secarse se pesa a intervalos predefinidos, puede trazarse la curva del contenido en humedad frente al tiempo de secado. Al diferenciar la curva anterior, se obtiene una información muy importante de la cinética de secado: La velocidad de secado en función del tiempo de operación o ratio de secado,  $DR$ . El ratio o velocidad de secado puede expresarse como se indica en la Ec. (10).

$$DR = \frac{dMR}{dt} = \frac{MR_{t+dt} - MR_t}{dt} \quad (10)$$

siendo  $dt$  la variación de tiempo (h) y  $DR$  el ratio de secado ( $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{seco}}/\text{h}$ ).

## 2.5. Propiedades psicrométricas.

Los procesos de secado dependen en gran medida de los cambios que se producen en las propiedades del agente desecante, generalmente aire húmedo (mezcla de aire seco y vapor de agua), cuya información se encuentra organizada en las conocidas cartas psicrométricas (Fig. 3).

Para entender las variaciones de las características del aire en el proceso de secado es necesario conocer la forma de determinar las variables psicrométricas. Aunque dichas propiedades son ampliamente conocidas, la determinación matemática de alguna de ellas (temperatura de rocío y temperatura de bulbo húmedo) no es trivial. A continuación se presentan las ecuaciones que permiten determinar las principales variables psicrométricas en un rango amplio de temperaturas (de  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), a partir de tres variables independientes de la mezcla aire-vapor de agua (aire húmedo) [02], [08], [16], [34], [35], [41], [46].

El aire húmedo es un sistema homogéneo de una fase y dos componentes y se puede asumir que sigue las leyes del gas ideal para las mezclas. Por tanto, las ecuaciones que se utilizan para la determinación de las diferentes propiedades psicrométricas se basan, en general, en la aproximación de considerar al aire húmedo como gas ideal.

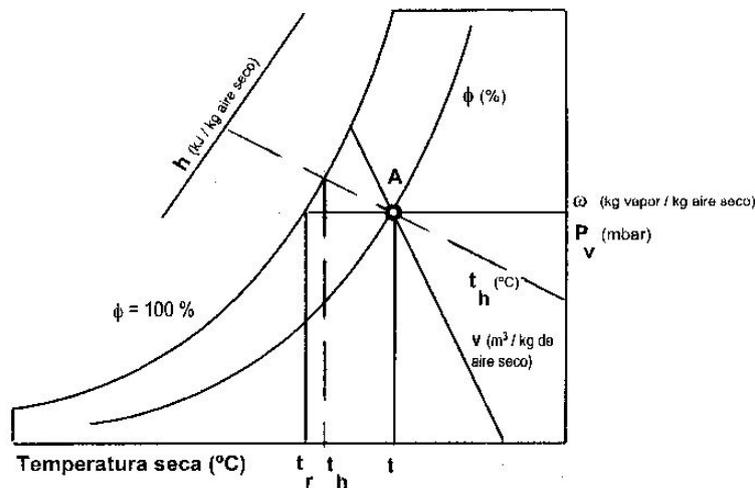


Figura 3. Carta psicrométrica.

### 2.5.1. Presión total, del aire seco y del vapor de agua.

Por ser el aire una mezcla de gases (aire seco y vapor de agua), la presión total es la suma de las presiones parciales de sus componentes, tal y como se expresa en la Ec. (11), donde la presión absoluta total,  $p_T$ , toma el valor de  $101325\text{ Pa}$  en condiciones normales.

$$p_T = p_{as} + p_v \quad (11)$$

La presión parcial del aire seco,  $p_{as}$ , por considerarse éste gas ideal, se muestra en la Ec. (12). Igualmente y asimilando el vapor de agua a un gas perfecto, se tiene la Ec. (13) para la presión parcial del vapor de agua,  $p_v$ .

$$p_{as}V = \frac{m_{as}}{M_{as}} R(T_s + 273.16) \quad (12)$$

$$p_vV = \frac{m_v}{M_v} R(T_s + 273.16) \quad (13)$$

donde  $V$  es el volumen del gas ( $m^3$ ),  $R$  la constante de los gases ideales,  $T_s$  la temperatura seca ( $^{\circ}C$ ),  $m_{as}$  y  $m_v$  son la masa de aire seco y de vapor de agua (kg) y  $M_{as}$  y  $M_v$  son el peso molecular del aire seco y el vapor de agua (kg/mol), respectivamente.

### 2.5.2. Presión de saturación.

La presión de saturación del vapor de agua es una variable básica en los cálculos psicrométricos. Existen varias expresiones con diferentes rangos de temperatura que buscan las más adecuadas y exactas relaciones. No obstante, se utilizarán las expresiones dadas por Singh [41] para los rangos de temperatura especificados a continuación en las Ecs. (14), (15) y (16).

$$p_{vs} = 610.78 \exp\left(\frac{21.874 T_s}{265 + 0.9615 T_s}\right) \quad (14)$$

para ( $-40^{\circ}C < T_s < 0^{\circ}C$ ) y ( $610.78 \text{ Pa} > p_{vs}$  o  $p_v > 12.838 \text{ Pa}$ );

$$p_{vs} = 610.78 \exp\left(\frac{17.269 T_s}{237.3 + T_s}\right) \quad (15)$$

para ( $0^{\circ}C < T_s < 63^{\circ}C$ ) y ( $610.78 \text{ Pa} < p_{vs}$  o  $p_v < 22870.52 \text{ Pa}$ );

$$p_{vs} = 610.78 \exp\left(\frac{17.269 T_s}{236.3 + 1.01585 T_s}\right) \quad (16)$$

para ( $63^{\circ}C < T_s < 110^{\circ}C$ ) y ( $22870.52 \text{ Pa} < p_{vs}$  o  $p_v < 143292.97 \text{ Pa}$ ).

### 2.5.3. Humedad absoluta.

La humedad absoluta, denominada también humedad específica o relación de humedad, es la masa de vapor de agua por unidad de masa de aire seco y se puede expresar según la expresión (17), o en función de las presiones, según la Ec. (18).

$$\omega = \frac{m_v}{m_{as}} \quad (17)$$

$$\omega = 0.62198 \frac{p_v}{p_T - p_v} \quad (18)$$

#### 2.5.4. Humedad relativa.

La humedad relativa, Ec. (19), se define como el cociente entre la presión parcial del vapor de agua en la mezcla a una temperatura dada,  $p_v$ , y la presión de saturación a la misma temperatura,  $p_{vs}$ .

$$\phi = \frac{p_v}{p_{vs}}; \quad \phi_{\%} = 100 \frac{p_v}{p_{vs}} \quad (19)$$

#### 2.5.5. Temperatura de rocío.

Para cada composición del aire húmedo, si se mantiene constante la presión parcial de vapor, se llega a una temperatura en la que se produce la saturación del vapor de agua, denominándose a este valor temperatura de rocío,  $T_{pr}$ . Se puede determinar utilizando ábacos psicrométricos a la actual presión de vapor ( $p_v$ ). Sin embargo, para un cálculo matemático más sistemático, necesario para la implementación de programas en computadora, se puede utilizar el método sugerido por Mittal y Zhang [34], (ver [35] y [02]). Definido el parámetro  $B$  según la expresión (20) es posible obtener la temperatura de rocío mediante las Ecs. (21) o (22).

$$B = \ln \left( \frac{p_v}{1000} \right) \quad (20)$$

$$T_{pr} = 6.09 + 12.608 B + 0.4569 B^2 \quad (21)$$

para  $T_{pr} < 0^\circ\text{C}$ ;

$$T_{pr} = 6.54 + 14.526 B + 0.7389 B^2 + 0.09486 B^3 + 0.4569 p_v^{0.1984} \quad (22)$$

para  $0^\circ\text{C} < T_{pr} < 93^\circ\text{C}$ .

#### 2.5.6. Temperatura de bulbo húmedo.

Esta temperatura se mide a partir de un termómetro de bulbo húmedo. Para determinarla analíticamente es necesario aplicar un proceso iterativo como el propuesto por Singh [41]. En éste, se determinan una serie de parámetros con los que se obtienen las variables  $T_{bh1}$  y  $T_{bh2}$ , y mediante comparación con un error predefinido, se conseguirá el valor final de la temperatura de bulbo húmedo,  $T_{bh}$ . A continuación, de la Ec. (23) a (25) se indican los parámetros a calcular para obtener  $T_{bh1}$ . Y de la Ec. (26) a (32), los necesarios para determinar  $T_{bh2}$ .

$$\omega_{bh} = \frac{0.4355 T_s + 5.1}{0.9} (1 - \phi) \quad (23)$$

$$T_{bh1} = T_s - \omega_{bh} \quad (24)$$

O bien si

$$T_{bh1} < T_{pr} \Rightarrow T_{bh1} = T_{pr} + 0.5 \quad (25)$$

Considerando  $p_{Sbh1}$  la presión de saturación a la temperatura  $T_{bh1}$ :

\*Si  $-40^\circ\text{C} < T_{bh} < 0^\circ\text{C}$

$$p_{Sbh1} = 610.78 \exp \left( \frac{21.874 T_{bh1}}{265 + 0.9615 T_{bh1}} \right) \quad (26)$$

\*Si  $0^{\circ}\text{C} < T_{bh} < 63^{\circ}\text{C}$

$$p_{Sbh1} = 610.78 \exp\left(\frac{17.269T_{bh1}}{237.3 + T_{bh1}}\right) \quad (27)$$

\*Si  $63^{\circ}\text{C} < T_{bh} < 110^{\circ}\text{C}$

$$p_{Sbh1} = 610.78 \exp\left(\frac{17.269T_{bh1}}{236.3 + 1.01585T_{bh1}}\right) \quad (28)$$

Para

$$h_{fg} = 1000 \cdot [3161.36 - 2.406(T_{bh1} + 273.16)] \quad (29)$$

$$B_1 = \frac{1006.925 (p_T - p_{Sbh1}) \left(1 + \frac{0.15557}{p_T} p_v\right)}{0.62194 h_{fg}} \quad (30)$$

$$\Delta = \frac{p_{Sbh1} - p_v}{T_{bh1} - T_{pr}} \quad (31)$$

$$T_{bh2} = \frac{B_1 T_s + \Delta T_{pr}}{B_1 + \Delta} \quad (32)$$

Si la diferencia entre  $T_{bh1}$  y  $T_{bh2}$  es mayor que una tolerancia especificada, se vuelve a la Ec. (26), (27) ó (28) con el valor de  $T_{bh2}$ , recalculando los nuevos valores de los parámetros  $h_{fg}$ ,  $B_1$ ,  $\Delta$  y  $T_{bh2}$ . En el instante en que se cumpla la tolerancia deseada, el último valor de  $T_{bh2}$  se considerará igual a la temperatura de bulbo húmedo ( $T_{bh} = T_{bh2}$ ).

### 2.5.6. Entalpía.

La entalpía del aire seco,  $h_{as}$ , teniendo en cuenta que la presión se puede considerar constante y el origen de referencia en  $0^{\circ}\text{C}$ , viene dada por la Ec. (33). La expresión de la entalpía para el vapor de agua,  $h_v$ , para la misma temperatura de referencia, tiene la forma dada en (34).

$$h_{as} = c_{pas} T_s = 1.006 T_s \quad (33)$$

$$h_v = c_f + c_{pv} T_s = 2501 + 1.77 T_s \quad (34)$$

De esta forma, la entalpía del aire húmedo se puede obtener a partir de las dos expresiones anteriores y llegar al resultado de la Ec.(35). Las unidades de entalpía vienen dadas en  $\text{kJ/kg}_{as}$  si la temperatura es expresada en  $^{\circ}\text{C}$ .

$$h = 1.006 T_s + \omega (2501 + 1.77 T_s) \quad (35)$$



La utilización de aire precalentado supone una optimización en un proceso de secado [17], mejorando el aumento de la temperatura la capacidad de arrastre de humedad. En la Fig. 4 se muestra, de forma esquemática, la ventaja de aumentar la temperatura seca del aire. Así, se considera un aire ambiente no saturado a temperatura  $T_1$ , humedad relativa  $\phi_1$ , temperatura de bulbo húmedo  $T_{bh1}$  y humedad absoluta  $\omega_1$  (punto A en la Fig. 4). Si el aire no es precalentado, éste seguirá la línea de enfriamiento adiabática  $T_{h1}$  (AB en la figura) y si idealmente el proceso continuara hasta la saturación, le correspondería una humedad absoluta  $\omega_2$ , lo que implicaría una extracción máxima de humedad dada por  $(\omega_2 - \omega_1)$ . Sin embargo, si el aire ambiente es precalentado (antes de usarse para el secado) a humedad absoluta constante  $\omega_1$ , hasta una temperatura seca  $T_2$ , con una humedad relativa  $\phi_2$ , (línea AC), el proceso de secado se correspondería con la nueva línea de enfriamiento adiabática  $T_{h2}$  (línea CD) que en condiciones de saturación le correspondería una humedad absoluta  $\omega_3$ . En este caso, el máximo valor de extracción de humedad se correspondería con  $(\omega_3 - \omega_1)$ .

Se aprecia, por tanto, que un aumento relativamente pequeño de la temperatura del aire incrementa considerablemente la capacidad de arrastre de humedad de éste. De manera aproximada, para el rango de temperaturas en el que tienen lugar los procesos de secado de productos agrícolas, cada  $^{\circ}\text{C}$  de incremento de la temperatura seca del aire provoca un aumento de su capacidad de arrastre de  $3.6 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{\text{agua}} / \text{kg}_{\text{aire húmedo no saturado}}$ . Para condiciones ambiente habituales, por ejemplo,  $20^{\circ}\text{C}$  y 59 % de humedad relativa el cambio a aire precalentado a  $35^{\circ}\text{C}$  con 25 % de humedad relativa, incrementa en más de tres veces la capacidad de arrastre del aire [17].

Por tanto, como se acaba de exponer, la capacidad deshidratante del aire depende principalmente de su humedad relativa, la cual es a su vez función de su temperatura. De esta forma, se pueden considerar tres posibles evoluciones del aire en el proceso de secado [14]:

**Evolución adiabática:** El sistema evoluciona sin intercambio de energía calorífica con el medio exterior. El producto a secar cede agua al aire, con lo que, descende la temperatura de ambos hasta que se alcanza el equilibrio correspondiente a la saturación adiabática y la humedad relativa alcanza el valor del 100 %. Conseguido este límite es imposible extraer más agua del producto.

**Circulación del aire en un proceso de secado sin aporte calorífico exterior:** Consiste en hacer pasar una corriente de aire, a temperatura ambiente y no saturado a través de un producto, sin recibir aporte de energía calorífica exterior. De esta forma el aire en contacto con el producto, extrae de éste parte de su humedad, con lo que la temperatura inicial de ambos descende. A lo largo de su recorrido, el aire aumenta su humedad relativa hasta alcanzar la saturación y además, si el recorrido es suficientemente largo y el caudal lo permite, la temperatura final será próxima a la de bulbo húmedo.

En un proceso eficiente y dado que la circulación forzada conlleva un coste, es necesario determinar el caudal de aire necesario para secar el producto en el menor tiempo posible. Aunque no existen fórmulas matemáticas exactas para obtener a priori este caudal, va a depender fundamentalmente de la naturaleza del producto y del tipo de secadero.

Sin embargo, existe la posibilidad de conocer si el proceso de secado se está efectuando en las condiciones adecuadas, mediante la medida de la temperatura a la salida del secadero y en puntos intermedios de éste. Así, si en los puntos

intermedios el aire tiene una temperatura próxima a la de saturación adiabática correspondiente a la temperatura del aire seco a la entrada, el caudal es insuficiente.

Por el contrario, si la temperatura disminuye progresivamente a lo largo del secadero, pero a la salida no experimenta un descenso apreciable, respecto a la entrada, el caudal de aire está dimensionado en exceso.

Por último, si la temperatura se mantiene constante a lo largo del proceso, se puede asegurar que el aire no sirve para secar el producto ya que se encuentra en equilibrio con él, debiendo por tanto, aumentar la capacidad desecante del aire (aumentando su temperatura, conducirlo a través de un material higroscópico, someter el producto a un proceso de vacío, etc).

**Proceso de secado con aporte energético directo:** Se utiliza para mejorar la capacidad desecante del aire, que como se ha indicado, aumenta con su temperatura. Este sistema combinado con el anterior, es el sistema más habitual de secado (convección forzada y aporte de energía calorífica).

## 2.6. Propiedades físicas del aire húmedo.

El comportamiento del aire húmedo no es constante con la temperatura. A continuación se presenta la dependencia de sus principales propiedades físicas con la temperatura [43].

Calor específico Ec. (39),  $C$  (J/kgK):

$$C = 999.2 + 0.1434 T_m + 1.101 \times 10^{-4} T_m^2 - 6.7581 \times 10^{-8} T_m^3 \quad (39)$$

siendo  $T_m$  la temperatura media del fluido considerado ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Densidad Ec. (40),  $\rho$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ):

$$\rho = \frac{353.44}{T_m + 273.15} \quad (40)$$

Viscosidad dinámica Ec. (41),  $\mu$  ( $\text{Ns}/\text{m}^2$ ):

$$\mu = 1.718 \times 10^{-5} + 4.62 \times 10^{-8} T_m \quad (41)$$

Viscosidad cinemática Ec. (42),  $\nu$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ ):

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (42)$$

Conductividad térmica Ec. (43),  $K_v$  ( $\text{W}/\text{mK}$ ):

$$K_v = 0.0244 + 0.7673 \times 10^{-4} T_m \quad (43)$$

Coefficiente de expansión térmica Ec. (44),  $\beta_t$  ( $\text{K}^{-1}$ ):

$$\beta_t = \frac{1}{T_m + 273.15} \quad (44)$$

## 2.7. Consumo energético en la eliminación de humedad.

La cantidad de agua a eliminar de una sustancia en un tiempo  $t$  (h) en un proceso de secado, para pasar de una humedad  $M_1$  a otra  $M_2$  (en base húmeda  $wb$  o seca  $db$ ) se puede obtener a partir de las expresiones dadas en la Ec. (45),

$$W_a = \frac{W_0}{t} \left( \frac{M_{wb1} - M_{wb2}}{1 - M_{wb2}} \right) = \frac{W_d}{t} (M_{db1} - M_{db2}) \quad (45)$$

donde  $W_a$  es la cantidad de agua retirada en el intervalo de tiempo ( $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{h}$ ) y como se ha indicado anteriormente,  $W_0$  es el peso inicial de material sin secar (kg),  $M_{wb1}$  y  $M_{wb2}$  son la humedad en base húmeda ( $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{prod.húmedo}}$ ) en el estado inicial y en el estado final,  $W_d$  es el peso de la materia seca en el producto (kg),  $M_{db1}$  y  $M_{db2}$  son la humedad en base seca ( $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{prod.seco}}$ ) en el estado inicial y en el estado final respectivamente.

En este caso, el consumo de aire para pasar del estado 1 al 2, en ese intervalo de tiempo, viene dado por la Ec. (46),

$$m_a = \frac{W_a}{\omega_2 - \omega_1} \quad (46)$$

siendo  $m_a$  el consumo de aire seco ( $\text{kg}/\text{h}$ ),  $W_a$  la cantidad de agua eliminada ( $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{h}$ ) y  $\omega_1$  y  $\omega_2$  las humedades absolutas del aire en los estados 1 al 2 respectivamente ( $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{aire.seco}}$ ).

De esta forma, es posible obtener la energía teórica necesaria para eliminar los  $W_a$  ( $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{h}$ ) en el proceso de secado para pasar de un estado 1 a otro 2, Ec. (47):

$$Q_a = m_a (h_2 - h_1) \quad (47)$$

siendo  $Q_a$  la potencia consumida ( $\text{kJ}/\text{h}$ ),  $m_a$  el consumo de aire ( $\text{kg}_{\text{aire.seco}}/\text{h}$ ) y  $h_1$  y  $h_2$  las entalpías del aire en los estados 1 al 2 respectivamente ( $\text{kJ}/\text{kg}_{\text{aire.seco}}$ ).

## 2.8. Eficiencia del secado.

Existen diferentes ratios para evaluar las prestaciones energéticas de un proceso de secado. Uno de los más comúnmente empleados el *consumo energético unitario*,  $CEU$ , definido como la cantidad de energía suministrada por cantidad de agua evaporada, Ec. (48).

$$CEU = \frac{\text{energía suministrada}}{\text{agua evaporada}} \quad (48)$$

Por otro lado, la eficiencia de un secadero se puede definir mediante la expresión (49).

$$\varepsilon = \frac{\text{energía suministrada}}{\text{energía utilizada} + \text{energía perdida en el aire a la salida}} \quad (49)$$

Así, en el caso de disponer de un secadero sin recirculación, la ecuación anterior puede expresarse según (50).

$$\varepsilon_T = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_a} \cdot 100 \quad (50)$$

donde  $\varepsilon_T$  es la eficiencia del secado en términos de temperatura (%),  $T_1$  es la temperatura del aire a la entrada del secadero ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_2$  es la temperatura del aire a la salida del secadero ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_a$  es la temperatura del aire ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ ).

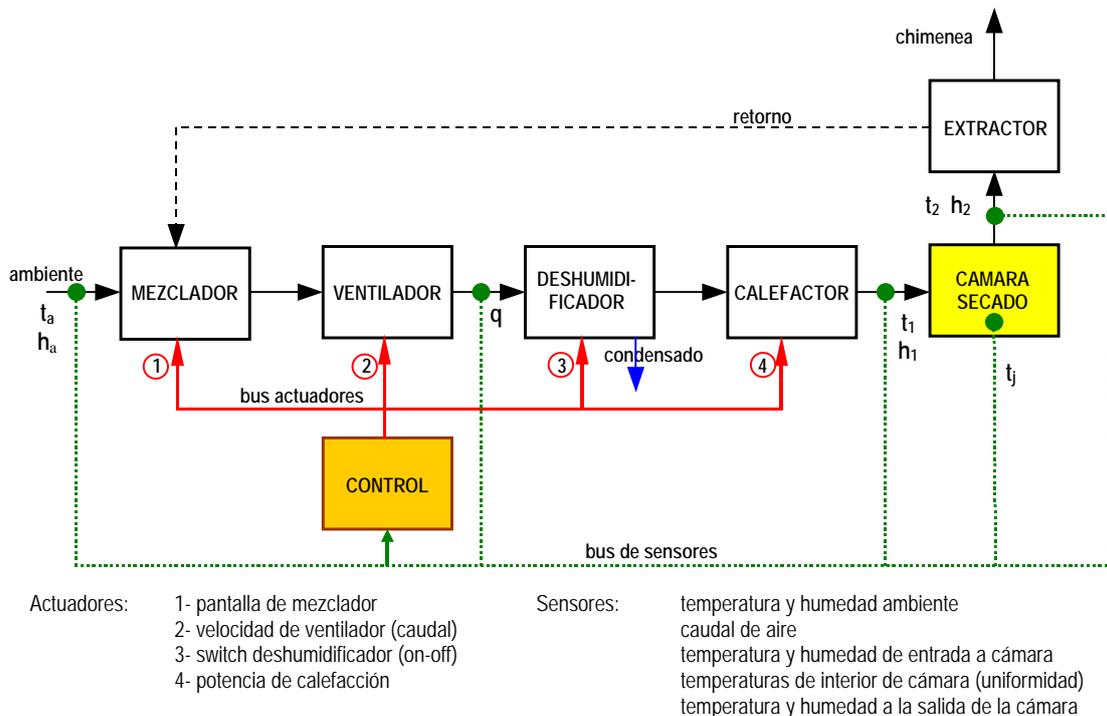
También es útil significar la eficiencia en términos de humedad eliminada por el aire de secado,  $\eta_p$ , Ec.(51) [30].

$$\eta_p = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_a - \omega_1} \cdot 100 \quad (51)$$

representando  $\eta_p$  la eficiencia del secado en términos de humedad (%),  $\omega_1$  la humedad absoluta del aire a la entrada del secadero,  $\omega_2$  la humedad absoluta del aire a la salida del secadero en condiciones de saturación adiabática y  $\omega_a$  la humedad absoluta del ambiente, expresándose las humedades en ( $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{aire}}$ ).

### 3. APLICACIÓN.

El diseño conceptual propuesto para la Planta de Desección Multipropósito contempla la reducción del contenido de humedad del aire ambiente por enfriamiento y condensación como etapa previa al calentamiento de la corriente de aire a ser insuflada en la cámara de desecación. Se pretende de esta manera controlar tres parámetros a la entrada de la cámara: la humedad del aire, su temperatura y su caudal, con el objetivo de lograr repetibilidad en el procesamiento de sucesivos lotes de productos. En los procesos preliminares de ajuste, se incluirá una balanza dentro de la cámara como sensor adicional destinado determinar para cada producto la condición de fin de secado.



**Figura 5.** Planta de Desección: esquema conceptual .

En la Fig. 5 se indica en forma de diagrama de bloques, las principales funciones a implementar. Debe aclararse aquí que el objetivo primario perseguido por el diseño no es una optimización del rendimiento energético de la planta, sino el aseguramiento de procedimientos con alto grado de repetibilidad, de modo tal de lograr productos finales de calidad elevada y uniforme y sanidad garantizada.

#### 4. REFERENCIAS.

- [01] L. Ait Mohamed, M. Kouhila, A. Jamali, S. Lahsasni, N. Kechaou and M. Mahrouz, "Single layer solar drying behaviour of Citrus aurantium leaves under forced convection," *Energy Conversion and Management*, vol. 29, no. 2, pp. 1473—1483, 2005.
- [02] J.I. Arranz Barriga, "Herramienta de Simulación de Procesos Aplicados al Secado Solar de Biomasa," Proyecto. Universidad de Extremadura, 2005.
- [03] N. Arslan and H. Togrul, "Modelling of water sorption isotherms of macaroni stored in a chamber under controlled humidity and thermodynamic approach," *Journal of Food Engineering*, vol. 69, no. 2, pp. 133—145, 2005.
- [04] N. Arslan and H. Togrul, "The fitting of various models to water sorption isotherms of tea stored in a chamber under controlled temperature and humidity," *Journal of Stored Products Research*, 2005.
- [05] ASAE D245.4 DEC93, "Moisture relationships of grains," ASAE STANDARDS, Tech. Rep., 1994.
- [06] N.A. Aviara, O.O. Ajibola and U.O. Dairo, "Thermodynamics of Moisture Sorption in Sesame Seed," *Biosystems Engineering*, vol. 83, no. 4, pp. 423—431, 2002.
- [07] N.A. Aviara, O.O. Ajibola and S.A. Oni, "Sorption Equilibrium and Thermodynamic Characteristics of Soya Bean," *Byosystems Engineering*, vol. 87, no. 2, pp. 179—190, 2004.
- [08] A. Ayensu, "Dehydration of food crops using a solar convective heat flow," *Solar Energy*, vol. 59, no. 4-6, pp. 121—126, 1997.
- [09] D.A. Balladin, I. Chang Yen, D.R. McGaw and O. Headley, "Solar drying of west Indian ginger rhizome using a wire basket dryer," *Renewable Energy*, vol. 7, no. 4, pp. 409—418, 1996.
- [10] G.L. Barker, "Equilibrium Moisture Content of Cotton Plant Components," *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 63, no. 4, pp. 353—364, 1996.
- [11] J.A. Barreiro, S. Fernández and A.J. Sandoval, "Water sorption characteristics of six row barley malt (*Hordeum vulgare*)," *Lebensmittel-Wissenschaft und -Technologie*, vol. 36, no. 1, pp. 37—42, 2003.
- [12] J.G. Brammer and A.V. Bridgwater, "Drying technologies for an integrated gasification bio-energy plant," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 3, no. 4, pp. 243—289, 1999.
- [13] S. Breto, J.L. Serrano y M. Muñoz, *Manual de secaderos*. Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 1998.
- [14] R. Corvalan, M. Horn, R. Roman y L. Saravia, *Ingeniería del secado solar*. CYTED-D, 1995.

- [15] A.G. Durakova and N.D. Menkov, "Moisture sorption characteristics of chickpea flour," *Journal of Food Engineering*, vol. 68, no. 4, pp. 535—539, 2005.
- [16] P.W. Egolf, B. Frei and R. Fuster, "Thermodynamics of moist air: contribution to error estimates," *Applied Thermal Engineering*, vol. 20, no. 1, pp. 1—19, 2000.
- [17] O.V. Ekechukwu, "Review of solar-energy drying systems I: an overview of drying principles and theory," *Energy Conversion and Management*, vol. 40, no. 6, pp. 593—613, 1999.
- [18] O.V. Ekechukwu and B. Norton, "Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology," *Energy Conversion and Management*, vol. 40, no. 6, pp. 615—655, 1999.
- [19] A.A. El-Sebaili, S. Aboul-Enein, M.R.I. Ramadan and H.G. El-Gohary, "Empirical correlations for drying kinetics of some fruits and vegetables," *Energy*, vol. 27, no. 9, pp. 845—859, 2002.
- [20] P. Fito, A. Grau, J.M. Barat y A. Albors, *Introducción al secado de alimentos por aire caliente*. Editorial de la UPV, Valencia, 2001.
- [21] S.A. Giner and M.C. Gely, "Sorptional Parameters of Sunflower Seeds of Use in Drying and Storage Stability Studies," *Biosystems Engineering*, vol. 92, no. 2, pp. 217—227, 2005.
- [22] D. Gudiño, "Estudio comparativo de varios secadores solares tipo charola en el proceso de secado de Jamaica." *ISES Forum*, 2000.
- [23] E. Kavak, "Experimental determination of convective heat transfer coefficient of some agricultural products in forced convection drying," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 31, no. 4, pp. 585—595, 2004.
- [24] E. Kavak, Y. Bicer and F. Cetinkaya, "Modelling of thin layer drying of parsley leaves in a convective dryer and under open sun," *Journal of Food Engineering*, 2005.
- [25] F. Kneule, *El secado*. Urmo, S.A. de Ediciones, Bilbao, 1982.
- [26] T. Koyuncu, U. Serdar, and I. Tosum, "Drying characteristics and energy requirement for dehydration of chestnuts (*Castanea sativa* Mill.)," *Journal of Food Engineering*, vol. 62, no. 2, pp. 165—168, 2004.
- [27] M.K. Krokida, E. Foundoukidis and Z. Maroulis, "Drying constant: literature data compilation for foodstuffs," *Journal of Food Engineering*, vol. 61, no. 3, pp. 321—330, 2004.
- [28] T. Kudra and A.S. Mujumdar, *Advanced Drying Technologies*. Marcel Dekker, Inc, New York, 2002.
- [29] W.J. Lamond and R. Graham, "The Relationship between the equilibrium moisture content of grass mixtures and the temperature and humidity of the air," *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 56, no. 4, pp. 327—335, 1993.
- [30] M. A. Leon, S. Kumar and S.C. Bhattacharya, "A comprehensive procedure for performance evaluation of solar food dryers," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 6, no. 4, pp. 367—393, 2002.
- [31] A. Lopez, A. Iguaz, A. Esnoz and P. Virseda, "Modelling of Sorption Isotherms of Dried Vegetable Wastes from Wholesale Market," *Drying Technology*, vol. 18, no. 4-5, pp. 985—995, 2000.

- [32] M. Maskan and F. Gögüs, "The Fitting of Various Models to Water Sorption Isotherms of Pistachio Nut Paste," *Journal of Food Engineering*, vol. 33, no. 3-4, pp. 227—237, 1997.
- [33] M.L. Medeiros, A.M. Bartolomeu, R. Nogueira and S. Caetano, "Sorption isotherms of cocoa and cupuassu products," *Journal of Food Engineering*, vol. 73, no. 4, pp. 402—406, 2006.
- [34] G.S. Mittal and J. Zhang, "Artificial Neural Network-based Psychrometric Predictor," *Biosystgems Engineering*, vol. 85, no. 3, pp. 283—289, 2003.
- [35] I. Montero, M.T. Miranda, A.R. Celma y S. Rojas, "Programación para el cálculo numérico de propiedades psicrométricas." IV Jornadas Nacionales de Ingeniería Termodinámica. Logroño, La Rioja, 2005.
- [36] I. Montero Puertas, "Modelado y construcción de un secadero solar híbrido para residuos biomásicos". Tesis Doctoral, Universidad de Extremadura, Escuela de Ingenierías Industriales, Badajoz, Noviembre de 2005. *Universidad de Extremadura Servicio de Publicaciones*.
- [37] A.S. Mujumdar, *Drying Technology in Agriculture and Food Sciences*. Science Publishers, Inc, Enfield - NH, USA, 2000.
- [38] A. Pezzutti and G.H. Crapiste, "Sorptional Equilibrium and Drying Characteristics of Garlic," *Journal of Food Engineering*, vol. 31, no. 1, pp. 113—123, 1997.
- [39] J.A. Ribeiro, D.T. Oliveira, M.L. Passos and M.A.S. Barrozo, "The use of nonlinearity measures to discriminate the equilibrium moisture equations for Bixa orellana seeds," *Journal of Food Engineering*, vol. 66, no. 1, pp. 63—68, 2005.
- [40] M.E. Schmalko and S.M. Alzamora, "Modelling the drying of a twig of yerba mate considering as a composite material Part I: shrinkage, apparent density and equilibrium moisture content," *Journal of Food Engineering*, vol. 66, no. 4, pp. 455—461, 2005.
- [41] A.K. Singh, H. Singh, S.P. Singh and R.L. Sawhney, "Numerical calculation of psychrometric properties on a calculator," *Building and Environment*, vol. 37, no. 4, pp. 415—419, 2002.
- [42] J. Stencl, "Modelling the water sorption isotherms of yoghurt powder spray," *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 65, no. 1-2, pp. 157—164, 2004.
- [43] G.N. Tiwari, *Solar Energy. Fundamentals, Design, Modelling and Applications*. Alpha Science International Ltd., New Delhi, India, 2002.
- [44] I.T. Togrul and D. Pehlivan, "Modelling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process," *Journal of Food Engineering*, vol. 65, no. 3, pp. 413—425, 2004.
- [45] T.Y. Tunde-Akintunde, T.J. Afolabi and B.O. Akintunde, "Influence of drying methods on drying of bell-pepper (*Capsicum annum*)," *Journal of Food Engineering*, vol. 68, no. 4, pp. 439—442, 2005.
- [46] R. Yun, Y. Kim and M. Min, "Modeling of frost growth and frost properties with airflow over a flat plate," *International Journal of Refrigeration*, vol. 25, no. 3, pp. 362—371, 2002.

