

## ANÁLISIS ENERGÉTICO-EXERGÉTICO DEL SECADO CONVECTIVO DE RESIDUOS DEL TOMATE INDUSTRIAL.

Antonio Ruiz Celma

Miriam Tapia Delgado

Ana M<sup>a</sup> Vizcaíno Galán,

Francisco Cuadros Blázquez

Fernando López-Rodríguez

*Escuela de Ingenierías industriales. Universidad de Extremadura,*

### Abstract

This work presents the results of energy-exergy analysis of convective drying of industrial tomato by-products, peels and seeds. The experiments were carried out in the range of drying air temperature 25-45°C. The drying air flow was maintained between 1 and 1.3 m/s. Under these conditions, drying times ranged between 504 and 192 minutes, to reduce the moisture content of 63% to 5%, by weight and wet basis.

Using the first law of thermodynamics, the energy analysis of the drying process and the energy utilization ratio was calculated, ranging between 2.73-18.12%. By using the second law of thermodynamics, the exergy analysis was developed to determine its behavior with different operating variables. Also, exergy losses suffered during the drying process were calculated, and it was found to be higher with the increased of the drying temperature, becoming less significant increases in air velocity. The greatest losses were recorded for the temperature of 45 °C, reaching a value of 0.038 kJ / s. The exergy efficiency of the drying chamber decreases with increasing temperature. The best efficiency is achieved for a temperature of 25 °C and 1 m/s air velocity.

**Keywords:** *Energy-exergy analysis; Convective drying; Tomato by-products; Moisture Content.*

### Resumen

En este trabajo se presentan los resultados del análisis energético-exergético del secado convectivo de los subproductos del procesado del tomate industrial, pieles y semillas. Los ensayos se llevaron a cabo en el rango de temperatura de secado del aire de 25-45 °C. El flujo de aire de secado se mantuvo entre 1 y 1.3 m/s. Bajo estas condiciones, los tiempos de secado oscilaron entre 504 y 192 minutos, para reducir el contenido en humedad de un 63% a un 5%, en peso y base húmeda.

Utilizando la primera ley de la termodinámica se llevó a cabo el análisis energético del proceso de secado, calculándose el ratio de utilización de la energía, que oscila entre un 2.73-18.12%. Mediante la segunda ley de la termodinámica se desarrolló el estudio de la exergía para determinar su comportamiento con las diferentes variables de operación. Las pérdidas de exergía se incrementan al aumentar la temperatura del aire desecante, resultando menos significativo los aumentos en la velocidad del aire. Las mayores pérdidas se registraron para la temperatura de 45 °C, alcanzando el valor de

0,038 kJ/s. Las mejores eficiencias exergéticas se alcanzaron para la temperatura de 25°C y velocidad de 1 m/s.

**Palabras clave:** *Análisis energético-exergético; Secado convectivo; Subproductos de tomate; Contenido en humedad.*

## 1. Introducción

El secado térmico de materiales húmedos es una operación básica en numerosos procesos industriales, siendo la intensidad energética de la misma muy elevada. El consumo de energía depende, en todo caso, del tipo de producto a secar y de la tecnología empleada. Generalmente, cuanto mayor es la velocidad de secado, mayor es el consumo de energía (ASHRAE Handbook, 1999).

El proceso de secado térmico para sólidos puede ser considerado como el resultado de dos acciones simultáneas: una de transferencia de calor, donde el calor es comunicado al sólido húmedo para evaporar el líquido; y otra de transferencia de masa, en la cual el líquido o vapor se mueve dentro del sólido. Este movimiento del fluido depende de la estructura, características y humedad del material, abandonando el vapor la superficie del mismo. La separación del vapor del sustrato sólido depende de la presión y temperatura externa, de la superficie exterior del producto, del número de Reynolds y de la humedad del aire desecante.

Uno de los objetivos fundamentales en el diseño y optimización de los procesos de secado industrial es emplear la mínima cantidad de energía para la máxima eliminación de humedad posible, hasta alcanzar las condiciones finales del producto deseadas. En consecuencia, la cantidad y la calidad de la energía así como la transferencia de calor y de masa debería investigarse a lo largo de todo el proceso de secado (Akpınar et. al., 2006). Es decir, para el análisis térmico completo del proceso de secado convectivo es necesario utilizar los principios de conservación de la masa y la energía junto con el análisis exergético (primera y segunda ley de la termodinámica). El uso eficiente de los recursos energéticos se conseguirá reduciendo tanto como sea posible la destrucción y/o las pérdidas de exergía en los procesos físicos. Así, una de las metas del análisis exergético es localizar e identificar las causas de la destrucción y/o pérdidas de exergía, así como cuantificar su magnitud.

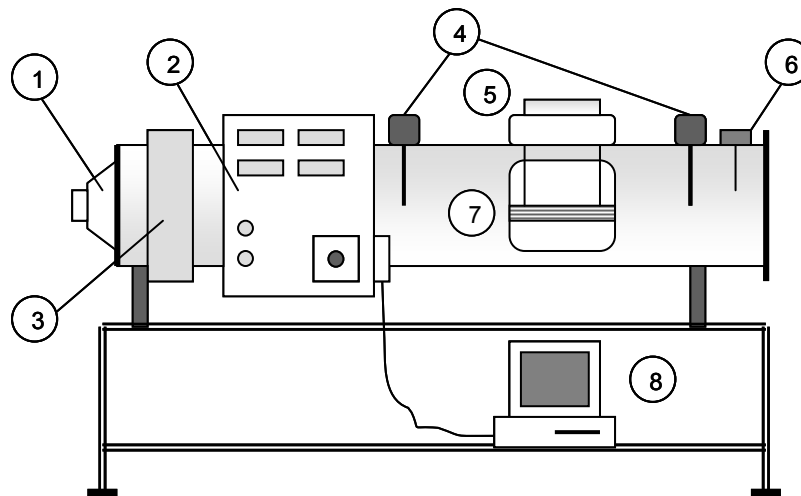
En este trabajo se analizan los balances energéticos y exergéticos del proceso de secado de pieles y pepitas del tomate industrial, llevados a cabo en un prototipo de secadero a escala de laboratorio bajo régimen de convección forzada, y con parámetros de funcionamiento dentro del rango típico que se encuentran en los secaderos solares.

## 2. Material y procedimiento experimental

Las muestras de pieles y semillas de tomate industrial proceden de una industria local de concentrado de tomate situada en la provincia de Badajoz. Las muestras presentaron un contenido en humedad inicial del  $62.98 \pm 1\%$ , en peso y base húmeda, y fue determinado conforme a la norma UNE 32 001 (1981).

Para este estudio, un secadero convectivo, Figura 1, fue utilizado como equipo experimental. El equipo incorpora un ventilador (1), una batería de resistencias (3) con un sistema de control del calentamiento (2), un conducto de aire (7), las bandejas de secado (5) y los instrumentos de medida (4 y 6). Para la adquisición de datos, el equipo dispone de una conexión USB (8) que se conecta al PC. El ventilador presenta un flujo volumétrico máximo de 700 m<sup>3</sup>/h con una potencia de 33 W. El caudal es ajustado mediante el regulador del número de revoluciones. El ratio de aire es medido

mediante un sensor de flujo, Schmidt SS 20.260, con rango de medición de 0.2 a 2.5 m/s y precisión de  $\pm 5\%$  del valor medido durante los experimentos. El sistema de calentamiento consiste en una batería de siete resistencias eléctricas de 500 W cada una; además, también se utilizó otro calentador de 1000 W adicional para la consecución de los flujos a mayor temperatura. Las dimensiones totales del equipo son de 2540 x 750 x 1350 mm, mientras que las del conducto de aire son de 2540 x 390 x 390 mm, con medidas interiores de 350 x 350 mm. Las bandejas son de  $\text{AlMg}_3$ , con dimensiones 400 x 300 x 15 mm. Para el control de la temperatura del aire, dos sensores de temperatura fueron instalados en el conducto de aire (Galltec + Mela TFK80J, con rango de temperatura  $-10-90\text{ }^\circ\text{C}$  y precisión y  $\pm 0.2\text{ }^\circ\text{C}$ ). Las principales características de la balanza digital (Kern & Sohn GmbH KB10000-1) usada son: 8000 g de carga máxima y resolución de 0.1 g.



**Figura 1: Equipo experimental de secado.**

El secadero convectivo fue emplazado en el interior de un laboratorio de forma que pudiera operar en la forma adecuada. Las muestras fueron colocadas en la bandeja en forma de capa fina, con un espesor de 10 mm. El peso de las muestras se mantuvo constante (350 g) para cada experimento. Los experimentos fueron llevados a cabo para unas temperaturas del flujo de aire de entrada a la cámara de  $25\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $35\text{ }^\circ\text{C}$  y  $45\text{ }^\circ\text{C}$ , y unas velocidades del aire de 1 m/s y 1.3 m/s. La adquisición de los datos, para el análisis de los resultados, se realizó cada 12 minutos. Los experimentos se dieron por finalizados cuando el contenido en humedad final de las muestras alcanzó aproximadamente el 5% en peso y base húmeda.

### 3. Análisis de datos

En la realización de este trabajo se utilizó el modelo termodinámico propuesto por Midilli y Kucuk (Midilli y Kucuk, 2003) para el análisis energético y exergético del proceso de secado en capa fina. En el análisis de la primera y segunda ley de la termodinámica, el secado en capa fina se considera como un proceso de flujo constante.

#### 3.1. Análisis energético: 1ª Ley de la Termodinámica

El proceso de acondicionamiento del aire a través del secadero convectivo incluye calentamiento, enfriamiento y humidificación. Estos procesos se pueden modelar como un proceso de flujo constante y ser analizados aplicando los principios de

conservación de masa (tanto para el aire como para la humedad) y conservación de energía.

La ecuación general para la conservación de la masa del aire de secado se puede escribir como:

$$\sum \dot{m}_{dai} = \sum \dot{m}_{dao} \quad (1)$$

donde  $\dot{m}_{dai}$  y  $\dot{m}_{dao}$  representan el flujo másico de aire de entrada y de salida, respectivamente.

La ecuación general de la conservación de la masa de la humedad se puede expresar:

$$\sum (\dot{m}_{wi} + \dot{m}_{mp}) = \sum \dot{m}_{wo} \quad \text{o} \quad \sum (\dot{m}_{dai} w_i + \dot{m}_{mp}) = \sum \dot{m}_{dai} w_o \quad (2)$$

donde  $\dot{m}_{wi}$  y  $\dot{m}_{wo}$  corresponden al flujo de entrada y de salida de la humedad del aire, respectivamente;  $\dot{m}_{mp}$  es el flujo de masa de la humedad del producto;  $w_i$  es la humedad específica de entrada y  $w_o$  la humedad específica de salida.

Finalmente, la ecuación general de la conservación de la energía es:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_{dao} \left( h_{dao} + \frac{v_{dao}^2}{2} \right) - \sum \dot{m}_{dai} \left( h_{dai} + \frac{v_{dai}^2}{2} \right) \quad (3)$$

donde  $h$  es la entalpía,  $v$  la velocidad del aire de secado,  $Q$  es el ratio de calor neto y  $W$  es el ratio de utilización de la energía.

En general, el proceso de secado convectivo depende de los cambios que ocurran en las propiedades de la corriente de aire de secado (aire húmedo en este caso). Por lo tanto es necesario determinar los valores de las principales variables psicrométricas para así poder analizar los cambios sufridos por el aire durante el proceso. Para ello el aire húmedo se considera un sistema homogéneo de una fase con dos componentes que es gobernado por la ley universal de los gases ideales para mezclas de fluidos. Las ecuaciones utilizadas para la determinación de las propiedades psicrométricas se basan en el hecho de considerar el aire húmedo como un gas ideal (Celma y Cuadros, 2009).

Durante el análisis energético y exergético del secado convectivo de los residuos del tomate industrial, se utilizaron las siguientes ecuaciones para el cálculo de la humedad y entalpía del aire de secado (Midilli y Kucuk, 2003):

La humedad relativa del aire de secado:

$$\phi = \frac{p_{v,T}}{p_{sat,T}} 100(\%) \quad (4)$$

donde  $p_{v,T}$  es la presión parcial de vapor del agua en la mezcla a una temperatura dada y  $p_{sat,T}$  es la presión de vapor saturado a la misma temperatura.

La entalpía del aire de secado:

$$h_{da} = c_{pda} T_{da} + w h_{sat,T} \quad (5)$$

donde  $c_{pda}$  define el calor específico del aire de secado,  $T_{da}$  es la temperatura de secado,  $w$  es la humedad específica y  $h_{sat,T}$  es la entalpía del vapor saturado.

Durante el proceso del secado del residuo de tomate en la bandeja en el interior de la cámara de secado, el calor utilizado ( $Q_u$ ) y el ratio de utilización de la energía (EUR) se pueden calcular utilizando la carta psicrométrica junto con las siguientes ecuaciones:

$$\dot{Q}_u = \dot{m}_{da} (h_{dci} - h_{dco}) \quad (6)$$

$$EUR = \frac{\dot{m}_{da} (h_{dci} - h_{dco})}{\dot{m}_{da} c_{pda} (T_{dci} - T_{hi})} \quad (7)$$

donde  $\dot{m}_{da}$  es el flujo másico del aire de secado;  $h_{dci}$  y  $h_{dco}$  son los valores de la entalpía a la entrada y la salida de la cámara de secado, respectivamente;  $T_{dci}$  es la temperatura del aire a la entrada y  $T_{hi}$  la temperatura del aire a la entrada del calentador, la temperatura ambiente.

### 3.2. Análisis exergético: 2ª Ley de la Termodinámica

La segunda ley de la termodinámica introduce el concepto de exergía, muy útil en el análisis de sistemas térmicos. El análisis exergético evalúa la energía disponible en diferentes puntos de un sistema, de modo que la exergía es una medida de la calidad de la energía. La segunda ley de la termodinámica utiliza el balance exergético para el análisis y el diseño de sistemas térmicos (R. Prommas et. al., 2010). Según esta ley se calcularon los flujos exergéticos de entrada y de salida, así como las pérdidas de exergía de la cámara de secado. La formulación matemática mediante la que se realizaron estas estimaciones se muestra a continuación (J. E. Ahern, 1980):

$$Exergy = (u - u_0) - T(s - s_0) + \frac{P_0}{J}(v - v_0) + \frac{V^2}{2gJ} + (z - z_0) \frac{g}{g_c J} + \sum_c (\mu_c - \mu_0) N_c + E_i A_i F_i (3T^4 - T_0^4 - 4T_0 T^3) + \dots$$

[Energía interna - Entropía + Trabajo + Momento + Gravedad + Energía Química + Emisión de radiación + ...]

$$(8)$$

El subíndice "0" denota las condiciones de referencia. En el análisis exergético de la mayoría de los sistemas, sólo algunos de los términos de la ecuación son utilizados. Una simplificación muy común es sustituir la entalpía por la energía interna y los términos PV, por tratarse de un sistema de flujo estático. El sistema termodinámico se suele encontrar bajo condiciones donde los términos gravitacional y el momento se desprecian. Además de todo esto, los cambios de presión en el sistema son también desechados ya que  $v \approx v_0$ . Por tanto la ecuación (8) quedaría como sigue:

$$Exergy = \dot{m}_{da} \bar{c}_p \left[ (T - T_0) - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right] \quad (9)$$

Sustituyendo en la ecuación (9) la temperatura del flujo de aire correspondiente a la entrada o a la salida de la cámara de secado, se puede calcular la exergía a la entrada o a la salida de la cámara de secado. La pérdida de exergía ( $\dot{E}_L$ ) se calcula mediante la ecuación (10):

$$\dot{E}_L = \dot{E}_{dci} - \dot{E}_{dco} \quad (10)$$

donde los subíndices "dci" y "dco" indican la entrada y la salida a la cámara de secado, respectivamente.

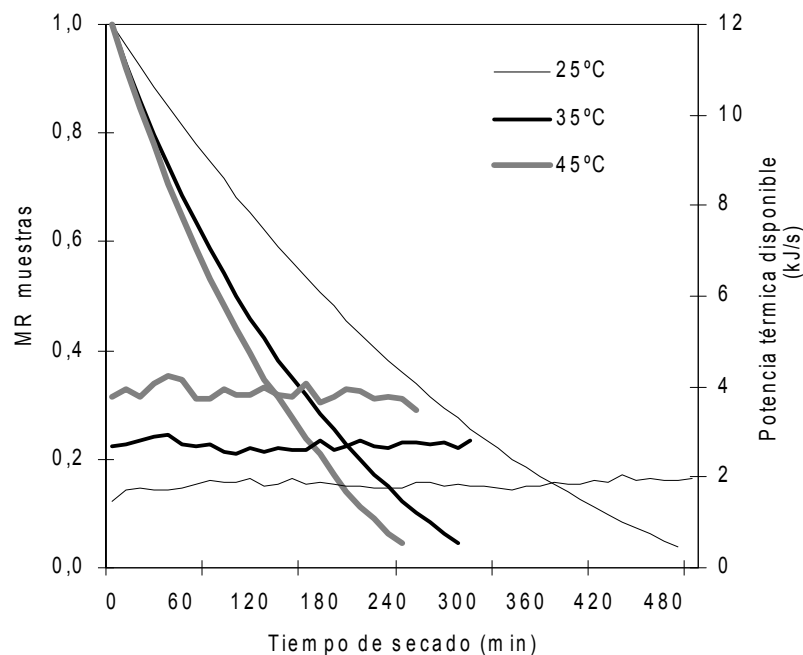
La ecuación general para la eficiencia exergética se expresa en la ecuación (11):

$$\varepsilon = 1 - \frac{\dot{E}_L}{\dot{E}_{dci}} \quad (11)$$

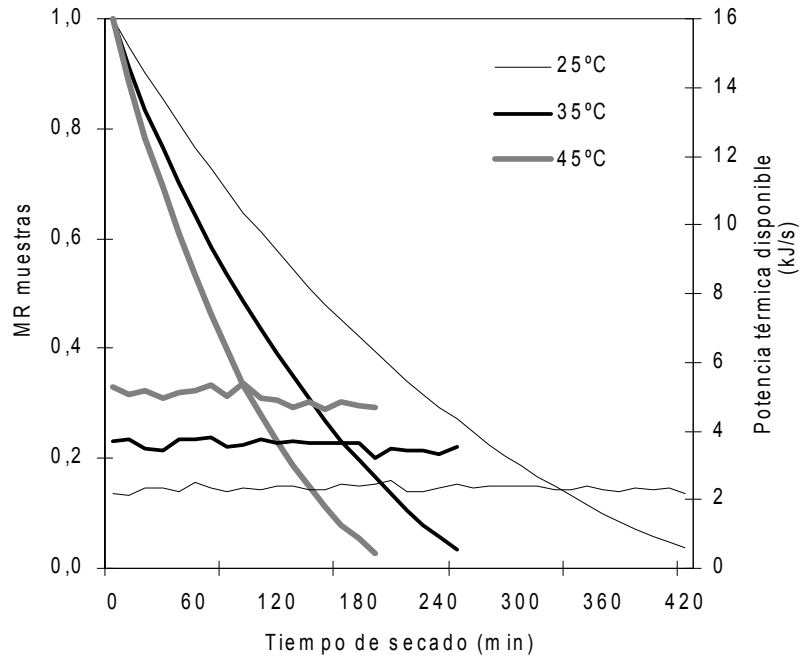
#### 4. Resultados y discusión

Las curvas de secado y los análisis de energía y exergía del proceso de secado convectivo en capa fina de las pieles y semillas del tomate industrial fueron realizados a partir de los datos conseguidos en los experimentos.

El contenido en humedad se calculó usando la expresión:  $M = ((W_0 - W) - W_1) / W_1$ , donde  $M$  es el contenido en humedad (g agua/ g materia seca),  $W_0$  es el peso inicial de la muestra (g),  $W$  es la cantidad de agua evaporada (g) y  $W_1$  es el contenido en materia seca de la muestra (g). Los datos de secado fueron expresados como variaciones del ratio de secado,  $MR$ , versus tiempo de operación. El ratio de secado adimensional puede ser calculado conforme a la ecuación simplificada (Midilli, 2001):  $MR = M_t / M_0$  en donde  $M_t$  y  $M_0$  son el contenido en humedad en cualquier instante y el contenido en humedad inicial. En las Figuras 2 y 3 se muestra la potencia térmica útil suministrada por el secadero y el ratio de humedad en función del tiempo de secado, y para ambas velocidades del aire de trabajo:

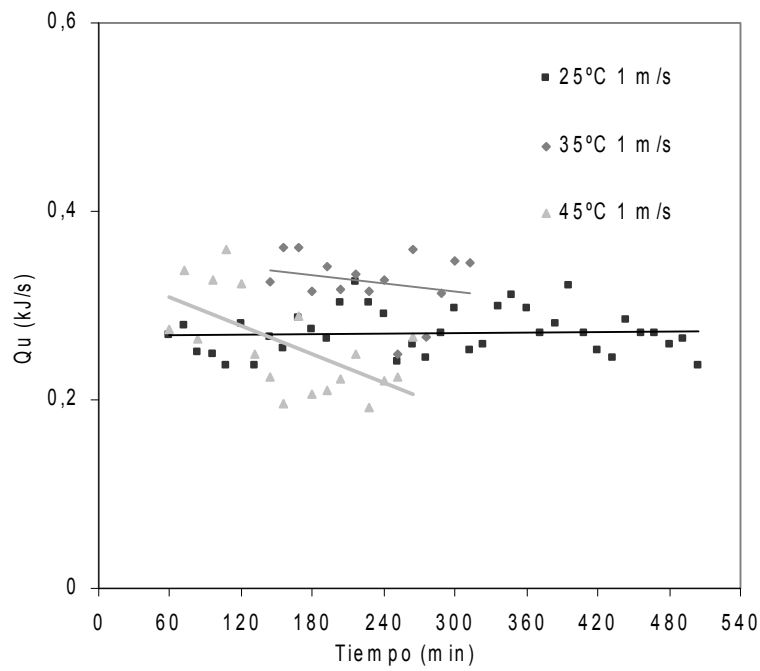


**Figura 2: Potencia térmica disponible y ratio de secado vs. tiempo de operación  
(V = 1 m/s).**

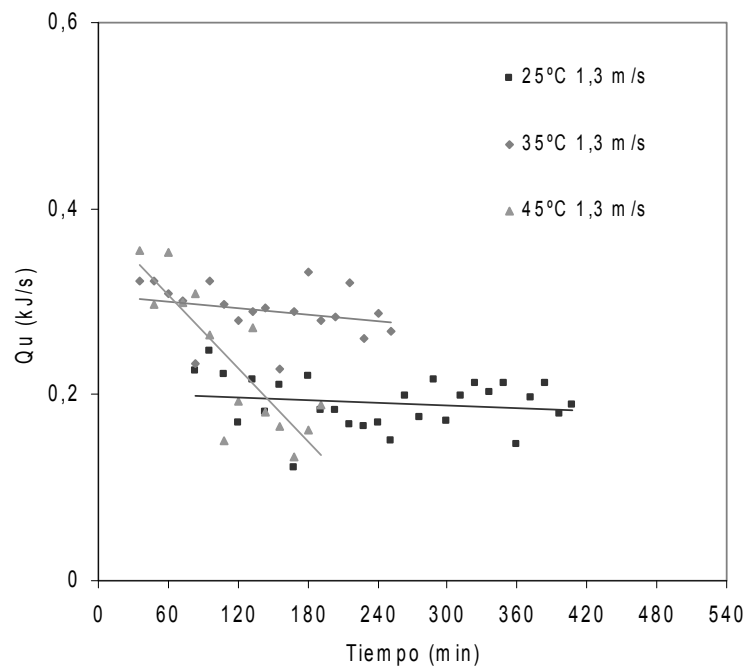


**Figura 3: Potencia térmica disponible y ratio de secado vs. tiempo de operación (V = 1.3 m/s).**

En las Figuras 4 y 5 se presentan la potencia térmica utilizada,  $Q_u$  (kJ/s), durante el proceso de secado convectivo de las diferentes muestras.



**Figura 4: Potencia térmica utilizada durante el secado (V = 1 m/s).**



**Figura 5: Potencia térmica utilizada durante el secado ( $V = 1.3$  m/s).**

La potencia térmica utilizada fue mayor y alcanzó las magnitudes más altas al comienzo de los procesos de secado, debido al mayor contenido en humedad de las muestras, mientras que presenta, en todos los casos, una tendencia a su reducción a medida que avanza el proceso. El máximo valor fue de 0.367 kJ/s, para una temperatura de 45 °C y una velocidad del aire de 1.3 m/s; el mínimo valor de la potencia térmica utilizada, de 0.120 kJ/s, se alcanzó cuando la temperatura fue de 25 °C y 1.3 m/s de velocidad del aire. Del análisis de las gráficas se desprende que se logra un incremento de la potencia utilizada, para todo el rango de velocidades, con el aumento de la temperatura de 25 °C a 35 °C; sin embargo, el aumento de temperatura hasta los 45 °C, si bien logra incrementar notablemente los valores de la potencia utilizada durante el comienzo del secado, posteriormente se reduce a magnitudes por debajo de las conseguidas para las otras condiciones.

Las Figuras 6 y 7 muestran las variaciones del ratio de utilización de la energía, EUR (%), con el tiempo de secado y para todos los rangos de temperatura y velocidad del aire. Se observa como las magnitudes del EUR se reducen a medida que se incrementa el tiempo de operación. El máximo valor del EUR de 18.123 % se alcanzó para una temperatura de 25 °C y 1 m/s de velocidad del aire. El mínimo valor del EUR de 2.730 % se presentó cuando la temperatura fue de 45 °C y 1.3 m/s. Los valores del EUR, en todos los casos, fueron bajos (por debajo del 20%); esto viene a significar que aún disponemos de energía para el secado en la corriente de aire que escapa del secadero. Por razones de eficiencia energética, sería precisa la recirculación de dicha corriente para la alimentación al secadero.



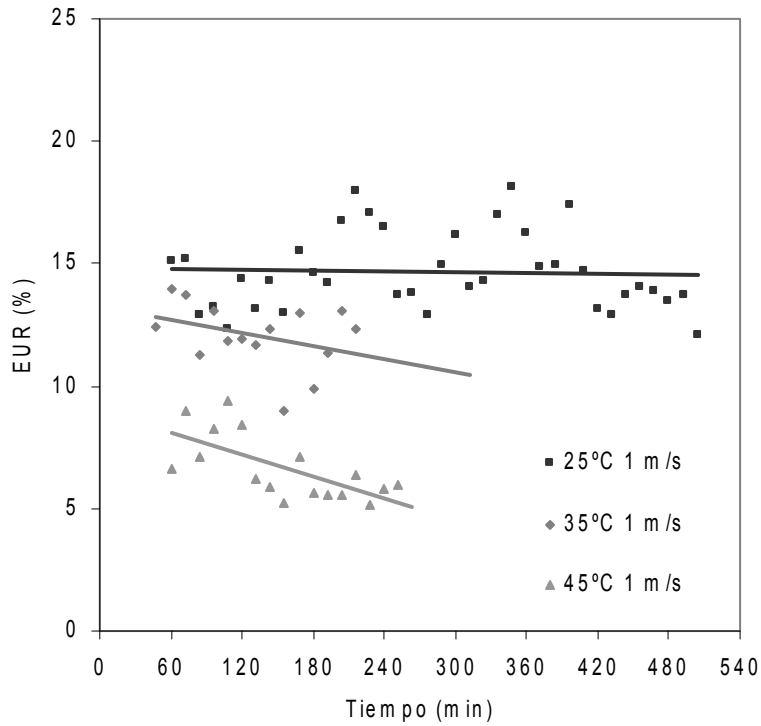


Figura 6: Ratio de utilización de la energía versus tiempo de secado (V = 1 m/s).

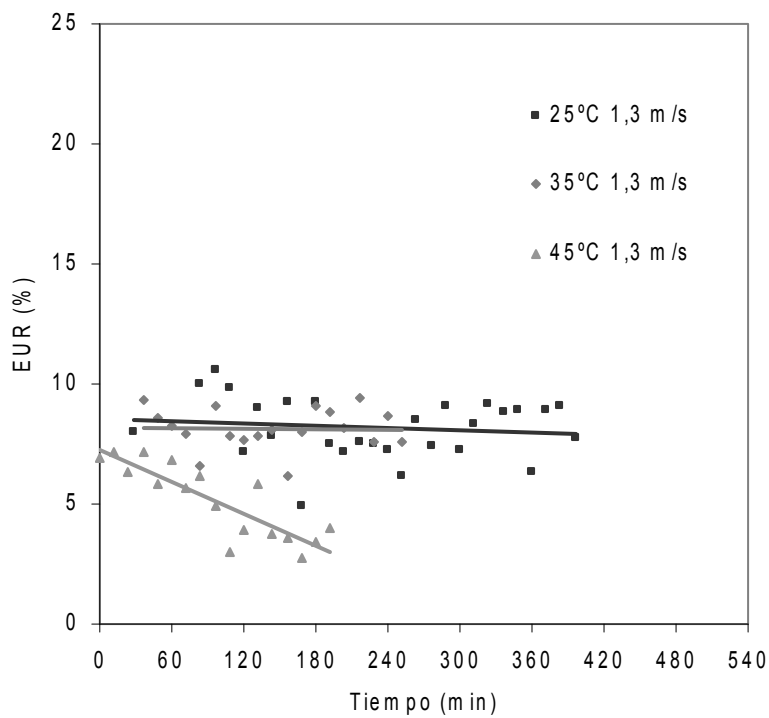


Figura 7: Ratio de utilización de la energía versus tiempo de secado (V = 1.3 m/s).

En las Figuras 8 y 9 se representa la pérdida de exergía sufrida por el aire de secado tras atravesar la muestra húmeda a lo largo de los distintos ensayos. Las magnitudes de las pérdidas exergéticas aumentan al incrementarse la temperatura del aire desecante, mientras que se observa una tendencia a la disminución de las mismas con el transcurso del proceso de secado, para todos los experimentos. El valor máximo se obtiene en el caso de 45 °C, para ambas velocidades, alcanzando los 0.038 kJ/s; mientras que los valores mínimos se dan para la temperatura de 25 °C y un flujo de aire de 1 m/s, situándose hacia el final del ensayo en torno a los 0 kJ/s, deteniéndose el proceso de secado.

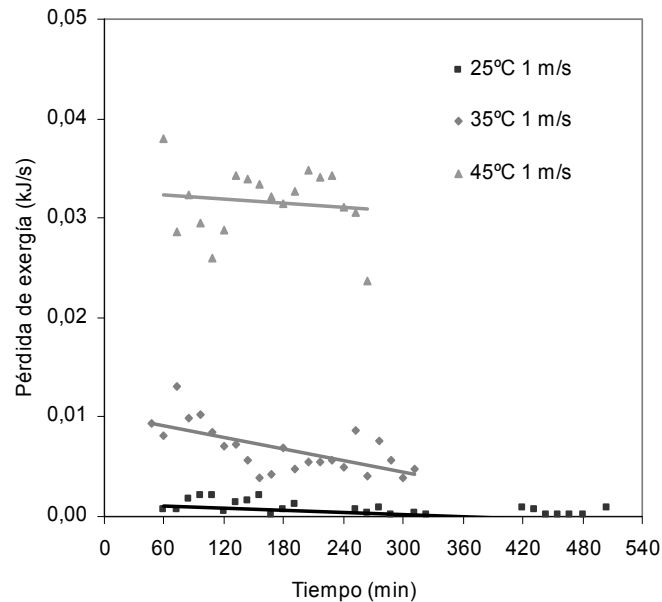


Figura 8: Pérdida de exergía durante el proceso de secado ( $V = 1 \text{ m/s}$ ).

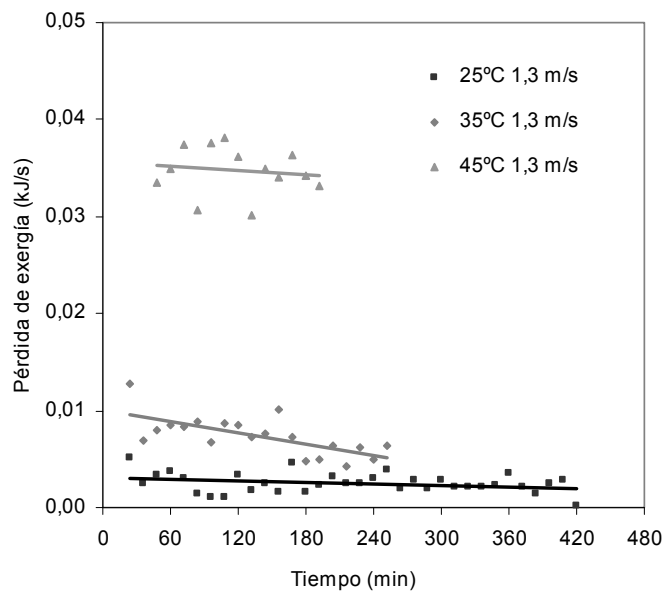


Figura 9: Pérdida de exergía durante el proceso de secado ( $V = 1.3 \text{ m/s}$ ).

Las Figuras 10 y 11 presentan la evolución de la eficiencia exergética para los casos estudiados. En todos los ensayos se muestra la tendencia del incremento de la eficiencia exergética con el tiempo de operación. Para una velocidad de viento de 1.3 m/s los datos varían desde 83,56% en el caso de 45 °C, hasta 99,43% para los 25 °C. Con un flujo de aire de 1 m/s los valores se encuentran entre un 73,31% para 45 °C, y el 100% de eficiencia en el caso de 25 °C. Con el empleo de bajas temperaturas de secado se consiguen mejores rendimientos exergéticos, pero a costa de mayores tiempos de trabajo (+ 162.5%).

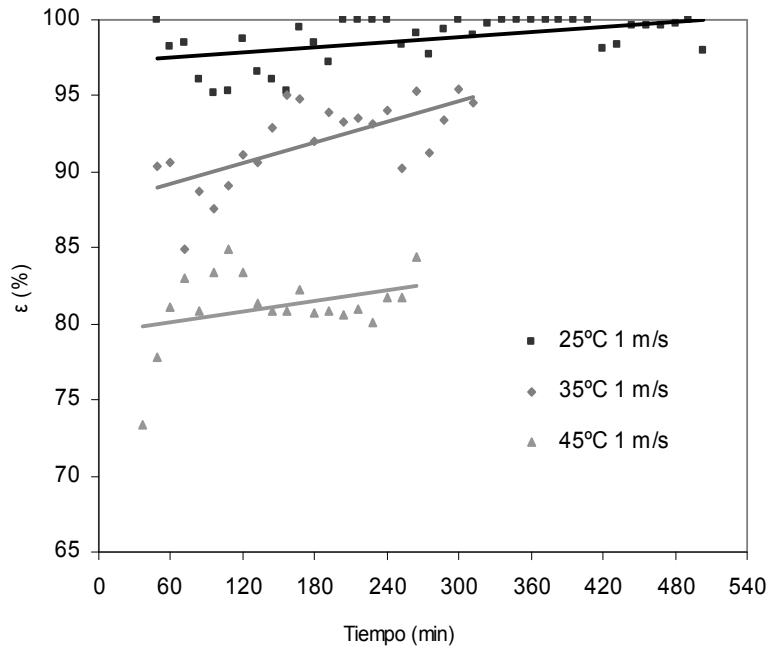


Figura 10: Variación de la eficiencia exergética en función del tiempo (V = 1 m/s).

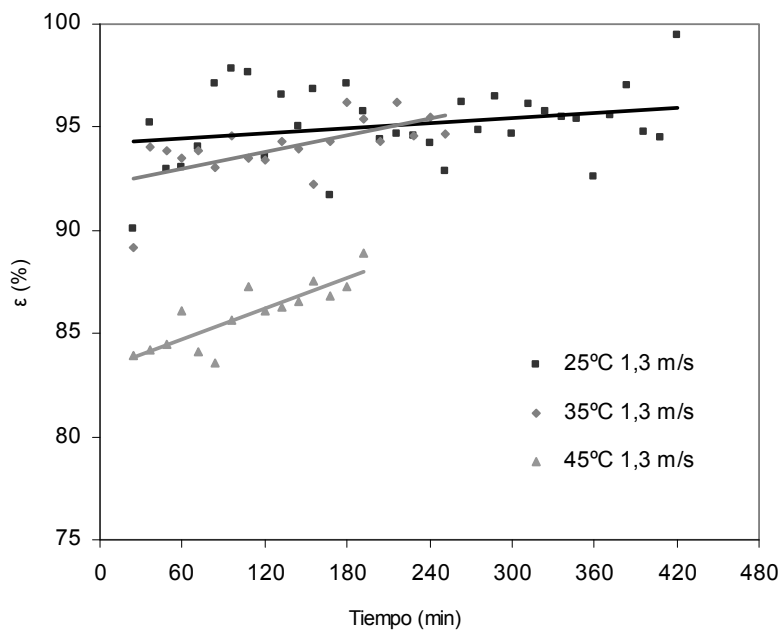


Figura 11: Variación de la eficiencia exergética en función del tiempo (V = 1.3 m/s).

## 5. Conclusiones

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos a partir de los ensayos desarrollados para las temperaturas de secado de 25 °C, 35 °C y 45 °C y los valores de flujo de aire de 1 m/s y 1,3 m/s, se pueden exponer las siguientes conclusiones:

- El tiempo total necesario para reducir el contenido en humedad inicial de los residuos de tomate industrial hasta un valor final de un 5% en peso y base húmeda, disminuye a medida que los valores de temperatura y flujo de aire se ven incrementados.
- Se presentan en todos los casos una tendencia a la reducción de la potencia térmica utilizada a medida que avanza el proceso de secado, siendo más acusada para los mayores niveles térmicos.
- Las magnitudes del ratio de utilización de la energía (EUR) se ven incrementados al disminuir los parámetros de secado. Así, los máximos valores se logran en el ensayo desarrollado a 25 °C y 1 m/s, mientras que los mínimos ocurren para el caso de 45 °C y 1,3 m/s.
- Las pérdidas exergéticas aumentan al incrementarse la temperatura del aire desecante, mientras que existe una tendencia a la disminución de las mismas con el tiempo de secado.
- La eficiencia exergética del 100% sucede cuando las pérdidas son nulas, pero en este caso, se interrumpe el proceso de secado.

## Referencias

Ahern, J. E. *The Exergy method of Energy Systems Analysis*. John Wiley, New York, 1980.

Akpınar, E. K., Midilli, A. and Bicer, Y. *The first and second law analyses of thermodynamic of pumpkin drying process*. Journal of Food Engineering, 2006; 72: 320–31.

Celma, A. R. and Cuadros, F. *Energy and exergy analyses of OMW solar drying process*. Renewable energy, 2009. 34: 660-666.

Drying and storing selected farm crops, 22.2. ASHRAE handbook: HVAC applications. SI ed., 1999.

Midilli, A. *Determination of pistachio drying behaviour and conditions in a solar drying system*. International Journal Energy Research, 2001. 25, 715-725.

Midilli, A. and Kucuk, H. *Energy and exergy analyses of solar drying process of pistachio*. Energy, 2003; 28: 539-556.

Prommas, R., Phandungsak, P., and Cholaseuk, D. *Energy and exergy analyses in drying process of porous media using hot air*. International Communications in Heat Mass Transfer, 2010. doi: 10.1016.

### **Agradecimientos**

Este trabajo ha recibido soporte financiero del Proyecto “Competitividad del Sector de Semielaborados de Tomate”, Subproyecto PSS-060000-2007-7, enmarcado en el Programa Nacional de Recursos y Tecnologías Agroalimentarias del Ministerio de Educación y Ciencia.

### **Correspondencia** (Para más información contacte con):

Miriam Tapia Delgado  
Escuela de Ingenierías industriales. Universidad de Extremadura,  
E-mail : miriamttdd@hotmail.com