

## Simplificación de modelo de secador de carne de res

ROMERO-PÉREZ, Claudia†, MARTÍN-DOMÍNGUEZ, Ignacio y VENEGAS-REYES, Eduardo

*Departamento de Tecnología Sustentable, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C.*

Recibido 16 de Octubre, 2017; Aceptado 15 de Diciembre, 2017

### Resumen

Entre los métodos de conservación de alimentos se encuentra el secado o deshidratación. Existen diversos modelos matemáticos para describir el secado de acuerdo a la geometría del secador y al producto a deshidratar. En este trabajo se presenta una simplificación de un modelo para secador tipo batch, en el que se puede simular el tiempo secado de varios alimentos, entre ellos la carne de res. El modelo es escrito en EES, y las características climáticas se procesan en TRNSYS. La simulación del secado se llevó a cabo dentro del concepto de evaporación de la humedad contenida en la carne. Se realizó una simulación a temperatura ambiente y otra simulación usando la temperatura promedio de 65 °C. La velocidad del aire es constante mientras que la humedad del aire y la temperatura ambiental son transitorias. La información del clima de este estudio corresponde a la ciudad de Chihuahua, México.

**Secado, solar, simulación, TRNSYS**

### Abstract

Among the methods of preserving food is drying or dehydration. There are several mathematical models to describe the drying according to the geometry of the dryer and the product to be dehydrated. In this paper we present a simplification of a model for batch dryer, in which the drying time of several foods, including beef, can be simulated. The model is written in EES, and the climatic characteristics are processed in TRNSYS. The simulation of the drying was carried out within the concept of evaporation of the moisture contained in the meat. A simulation was performed at room temperature and another simulation using the average temperature of 65 °C. The air velocity is constant while the air humidity and the ambient temperature are transient. The climate information for this study corresponds to the city of Chihuahua, Mexico.

**Drying, solar, simulation, TRNSYS**

**Citación:** ROMERO-PÉREZ, Claudia, MARTÍN-DOMÍNGUEZ, Ignacio y VENEGAS-REYES, Eduardo. Simplificación de modelo de secador de carne de res. Revista de Energías Renovables 2017. 1-3:43-50

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

El secado ha sido utilizado por la humanidad principalmente para la preservación de alimentos. Se sabe que el secado con aire caliente tiene altos costos de producción debido a que requiere consumo de gas o electricidad para su producción, ambos recursos no renovables. **Este trabajo es parte de** una propuesta para reducir el consumo de energía no renovable y consiste en diseñar un sistema de secado de **carne de res** asistido con energía solar térmica. Este sistema es diseñado e integrado en TRNSYS (Transcient Simulation System Tool). Sin embargo, dentro del modelo matemático para el secado de la carne de res encontramos con ecuaciones de isoterma de sorción de humedad del alimento. Muchos de estos coeficientes se encuentran publicados para muchos alimentos como frijol, maíz, harinas, hierbas, etc. Pero desafortunadamente para la carne de res no están disponibles. Es por esta razón que en este trabajo se presenta una simplificación del modelo matemático de secado en secador tipo batch. El modelo es escrito en EES (Engineering Equation Solver) y es útil no solo para describir el secado de la carne de res sino también otros alimentos.

Otros autores como (Fuller, Lhendup, & Aye, 2005) ya habían comentado la carencia de los coeficientes necesarios para la ecuación de sorción de la carne. Por lo que la mayoría de los trabajos que se encuentran sobre este alimento son investigaciones experimentales en las que describen la curva de secado del alimento.

## Temática General de la Carne de Res

La carne tiene una composición química bastante compleja y variable en función de un gran número de factores tanto extrínsecos como intrínsecos.

Por su composición la carne es considerada como un medio ideal para el crecimiento de muchos microorganismos, por lo que es clasificada entre los alimentos altamente perecederos (Gerard, 1991). El principio de conservación radica en que los microorganismos que causan el deterioro no pueden crecer ni multiplicarse en ausencia de agua (Belessiotis & Delyannis, 2011).

Carne de res	Contenido de agua % masa	Densidad kg/m <sup>3</sup>	Conductividad Térmica W/m °C	Difusividad m <sup>2</sup> /s	Calor Especifico kJ/kg °C
magra	74	1090	0.471	0.13X10 <sup>-6</sup>	3.54

**Tabla 3** Propiedades de la carne de res

*Fuente: Termodinámica, Cengel 4ª Edición, 2003*

## Requerimientos para el secado de carne de res

La carne que comúnmente se usa para el secado es la carne de res conocida como pulpa negra. Esta es secada a una temperatura entre 60 °C y 70 °C (Almada, Cáceres, Machaín-Singer, & Pulfer, 2005) con una velocidad de aire que varía desde la convección natural, hasta unos 5 m/s. Sin embargo, para este trabajo utilizaremos 0.1 m/s ya que, debido a la temperatura, el secador funciona como horno, evaporando de manera eficiente la humedad, y desechando el aire húmedo por el flujo de aire.

## Propiedades del aire

Los procesos de secado dependen en gran medida a los cambios que se producen en las propiedades del agente desecante, generalmente aire húmedo (mezcla de aire seco más vapor de agua). El uso de aire precalentado trae como resultado, la optimización en un proceso de secado, ya que el aumento de la temperatura mejora la capacidad de arrastre de humedad.

El producto a secar cede humedad al aire, por lo que desciende la temperatura de ambos hasta que alcanza el equilibrio correspondiente a la saturación adiabática y la humedad relativa alcanza el valor de 100 %. Conseguido este límite es posible extraer más agua del producto. Además, el aporte energético directo aumenta la temperatura, lo que mejora la capacidad desecante del aire. Este sistema combinado con lo anterior, es el sistema más habitual de secado (convección forzada y aporte de energía calorífica). La convección forzada se obtiene de un abanico que alimenta un flujo másico de aire proveniente del ambiente.

### Localización geográfica

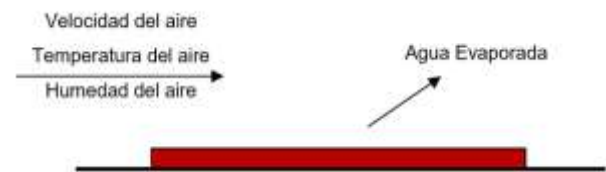
El sistema de secado se simula para las condiciones climáticas de la ciudad de Chihuahua, Chihuahua, México. Esta localización presenta una combinación de factores geográficos, como su topografía, altitud y latitud que provocan condiciones climáticas severas en el invierno con temperaturas que van desde los  $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$  por la noche, hasta los  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante el día. Estas condiciones se deben en gran parte a la altitud sobre el nivel del mar y a la baja humedad del aire. La humedad tiende a atrapar la radiación infrarroja emitida por la superficie terrestre, por lo tanto en ausencia de humedad, esta radiación tiende a perderse hacia la atmósfera, enfriándose tanto la superficie como el aire del medio circundante (Martin, 2004).

### Modelo de Evaporación de Agua

En la cámara de secado se pretende secar la mayor cantidad de agua posible en la carne. El proceso más sencillo para evaporar agua está basado en la saturación adiabática. Este proceso es utilizado en sistemas de enfriamiento evaporativo convencionales. (Tang & Etzion, 2004)

Menciona las diversas expresiones experimentales y teóricas para predecir la tasa de evaporación de agua libre en las superficies hacia el ambiente. Algunas de esas expresiones incluyen no solo los efectos de la corriente del aire sobre la superficie mojada, sino también la diferencia de la temperatura entre la superficie mojada y la temperatura del aire.

La evaporación del agua que se encuentra en la superficie de la carne, depende de la temperatura del agua de la carne, temperatura del aire, humedad actual del aire y la velocidad con la que pasa el aire sobre la superficie de la carne.



**Figura 1** Evaporación de agua

*Fuente: Elaboración propia.*

Para obtener la cantidad de agua evaporada se usó la siguiente expresión:

$$\dot{m}_{\text{vapor}} = \theta * A_{\text{superficie}} * (H_s - H_1) \quad (1)$$

*Termodinámica, Cengel 4ª Edición, 2003*

Donde  $\theta$  es un coeficiente de evaporación [ $\text{kg}_{\text{agua}} / \text{m}^2 \cdot \text{h}$ ],  $A_{\text{superficie}}$  es el área superficial de la carne [ $\text{m}^2$ ],  $T$  es temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $H_s$  humedad absoluta en aire saturado a la misma temperatura que el agua de la superficie [ $\text{kg}_{\text{agua}} / \text{kg}_{\text{aire}}$ ] y  $H_1$  humedad absoluta del aire de entrada

$$[\text{kg}_{\text{agua}} / \text{kg}_{\text{aire}}]. \quad (2)$$

$$\theta = (25 + 19 * v)$$

Termodinámica, Cengel 4ª Edición, 2003

Donde  $v$  es la velocidad del aire [m/s] para obtener el coeficiente evaporativo.

$$H_s = (0.62198 * P_{ws} P) / (P - P_{ws})$$

Termodinámica, Cengel 4ª Edición, 2003

(3)

Donde,  $P_{ws}$  es la presión de vapor de saturación [kPa] y  $P$  presión atmosférica del aire húmedo [kPa] para obtener la humedad absoluta en el aire saturado.

La máxima cantidad de vapor de agua que puede contener el aire es alcanzada cuando  $P_w = P_{ws}$  Establecidas las dimensiones, es posible obtener las áreas. El secador consta de una cámara de secado con charolas tipo estantería y se considera una cámara adiabática a la que le entra un flujo de aire caliente paralelo a las charolas.

El flujo másico del aire ( $\dot{m}_a$ ) es calculado por medio de su densidad ( $\rho_a$ ), la velocidad del viento ( $v$ ) y el área transversal libre ( $A_t$ ) de la cámara de secado Figura 2 y Figura 3.

$$\dot{m}_a = \rho_a * v * A_t \lambda$$

Termodinámica, Cengel 4ª Edición, 2003

(4)

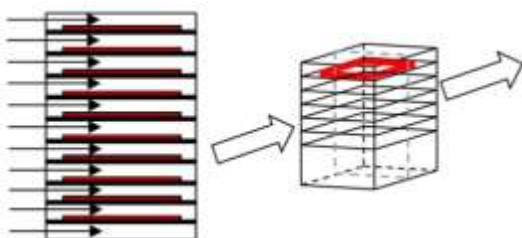


Figura 2 Flujo de aire paralelo a las charolas

Fuente: Elaboracion propia.

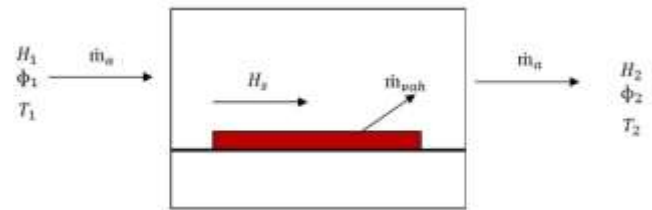


Figura 3 Arrastre de humedad evaporada

Fuente: Elaboracion propia.

### Metodología a desarrollar

Con ayuda de EES se elabora un algoritmo con el modelo de evaporación de agua de la superficie de la carne. Este modelo representa la transferencia de masa y energía que ocurren dentro de la cámara de secado. Los valores de entrada son la temperatura de bulbo seco y húmedo, la humedad del aire y la densidad del aire, estos provenientes del módulo de clima de TRNSYS usando un TMY de Chihuahua.

EES Engineering Equation Solver es un programa comercial que usa un sistema de soluciones de ecuaciones no lineales simultáneas. Este es muy útil en aplicaciones de Termodinámica y Transferencia de calor.

TRNSYS 16 es un programa de simulación dinámica de sistemas del campo de ingeniería y de las energías renovables, que ayuda a optimizar la eficiencia tanto térmica como económica de diferentes sistemas. En él, es posible conectar entre si los modelos de los componentes y obtener el comportamiento del sistema completo de manera transitoria.

En este trabajo se realizaron 2 corridas de la simulación del sistema, una usando temperatura ambiente y otra a una temperatura de 65 °C con el fin de comparar los tiempos de secado variando únicamente la temperatura en el proceso y manteniendo la velocidad del aire a una temperatura constante.

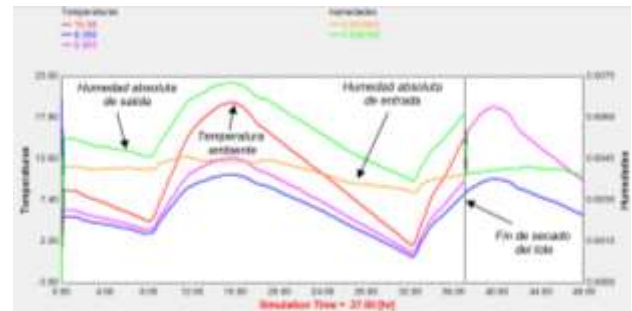
## Resultados

La información de temperatura ambiente, humedad relativa, humedad absoluta y densidad del aire son obtenidos de TRNSYS. Estos corresponden a información de clima de Chihuahua durante el día 1 y 2 de enero de un año típico con pasos de tiempo de 15 minutos. Sin embargo, estas mismas corridas realizadas en otra estación del año, proporcionarían diferentes tiempos de secado. El contenido de humedad inicial en el producto es de 74 % y debido a que al final conserva un 10 % de humedad, esta se descuenta de la cantidad de masa de agua que se evaporará.

La corrida 1, donde se usa la velocidad del aire constante a 0.1 m/s, mientras que la humedad del aire y la temperatura ambiental son transitorias. En esta corrida se calcula el tiempo de secado usando la temperatura ambiente del aire, dando como resultado un tiempo de 37 horas.

En la Gráfica 1, podemos distinguir las temperaturas (°C) del aire a la entrada y salida del secador en color rojo y rosa respectivamente. La temperatura del aire ambiente en color rojo describe el cambio de la temperatura a lo largo de dos días, con sus altas y bajas en el día y la noche. En color rosa se muestra que la temperatura del aire a la salida del secador es más baja debido al enfriamiento evaporativo que sufre el aire una vez que gana humedad. Estas temperaturas se igualan una vez que no hay más humedad que retirar. Las humedades absolutas (kg de agua/kg de aire seco) del aire de entrada y salida se muestran en color naranja y verde respectivamente. La humedad de entrada es muy baja, sin embargo, después de pasar por el secador el aire, ésta adquiere la humedad que se evapora por lo que aumenta como se observa en color verde.

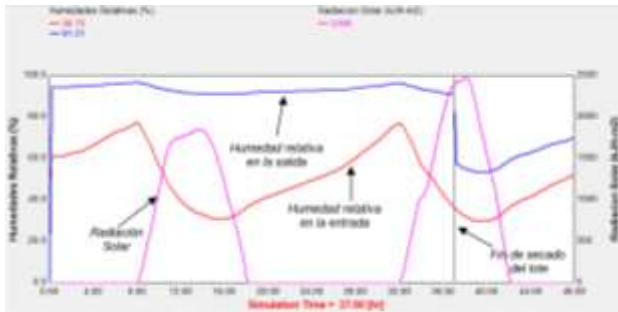
Se puede apreciar que durante las horas de sol en las cuales existe mayor temperatura ambiente, son las horas que tienen más arrastre de humedad debido a la influencia de la temperatura, como se explica con anterioridad en las propiedades del aire. Al igual que ocurrió con las temperaturas, una vez que no existe más evaporación, las humedades de entrada y salida se igualan. Finalmente, en color azul se muestra la temperatura de bulbo húmedo en la superficie del producto



**Gráfico 1** TEMPERATURAS Y HUMEDAD ABSOLUTA: Corrida 1 temperatura ambiente y velocidad del aire a 0.1 m/s

*Fuente: Impresión de resultados de TRNSYS.*

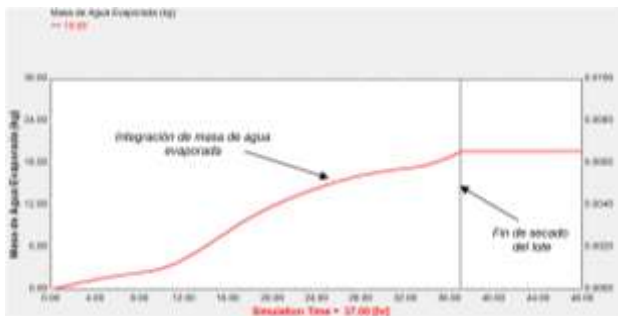
En la Gráfica 2, el color rojo muestra la humedad relativa antes de entrar al secador, esta humedad sube y baja de acuerdo a la humedad y temperatura del aire. Como se puede ver en los horarios de radiación, la humedad relativa baja por el aumento de temperatura en el aire y por el contrario en color azul la humedad relativa de salida aumenta por el enfriamiento del aire y la ganancia de humedad.



**Gráfico 2** HUMEDAD RELATIVA: Corrida 1 a temperatura ambiente y velocidad del aire a 0.1 m/s

Fuente: Impresión de resultados de TRNSYS.

En la Gráfica 3, la línea color rojo representa la cantidad de masa evaporada en cada paso de tiempo de la simulación. Los valores son integrados en TRNSYS hasta que se detecta que ya se evaporó el contenido de humedad deseado. En este caso se puede observar que la línea roja deja de acumular masa de agua después de 37 horas continuas de secado y que no presenta un crecimiento continuo por los cambios de temperatura.

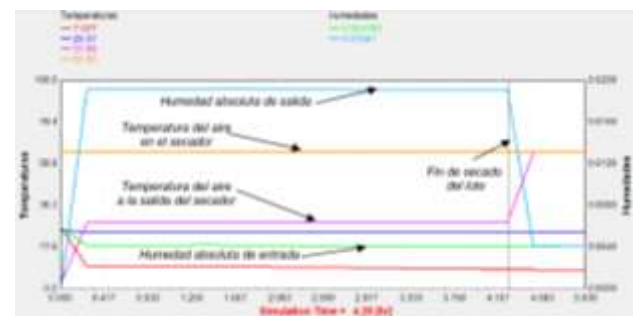


**Gráfico 3** MASA DE AGUA EVAPORADA: Corrida 1 a temperatura ambiente y velocidad del aire a 0.1 m/s

Fuente: Impresión de resultados de TRNSYS

La corrida 2, donde la temperatura es mantenida a 65 °C y la velocidad del aire se mantiene constante a 0.1 m/s y la humedad en el aire es transitoria. El secado para estas condiciones fue de 5 horas.

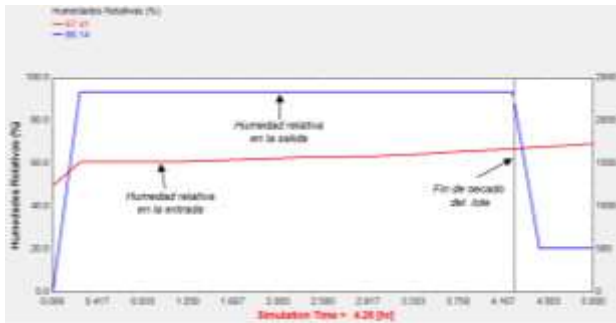
En la Gráfica 4, se muestra una corrida con una duración de 5 horas, esto debido a que se utilizó la temperatura de entrada constante al secador de 65 °C como se ve en color amarillo, acortando la residencia del producto en el secador. En color rojo esta la temperatura ambiente que se encuentra fuera del secador. En color azul se observa la temperatura de bulbo húmedo y en color rosa la temperatura del aire a la salida del secador que deja de enfriarse cuando ya no hay humedad que evaporar. En color verde encontramos la humedad absoluta del ambiente a la entrada del secador y en color azul cielo la humedad absoluta a la salida del secador con un aumento notable de humedad. En esta ocasión, los cambios en las variables no son tan obvios ya que el periodo de tiempo es más corto.



**Gráfico 4** TEMPERATURAS Y HUMEDAD ABSOLUTA: Corrida 2 a 65 °C y velocidad del aire a 0.1 m/s

Fuente: Impresión de resultados de TRNSYS

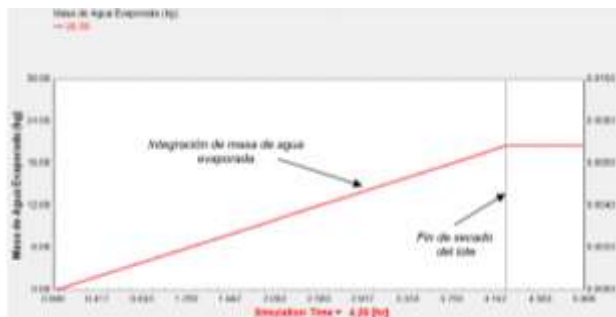
En la Gráfica 5, la línea color rojo que corresponde a la humedad relativa fuera del secador es casi constante por el corto periodo de tiempo, al igual que la humedad relativa a la salida del secador que se muestra en color azul, sin embargo, ésta sufre un aumento por el enfriamiento evaporativo y ganancia de humedad.



**Gráfico 5** HUMEDAD RELATIVA: Corrida 2 a 65 °C y velocidad del aire a 0.1 m/s

Fuente: Impresión de resultados de TRNSYS

En la Gráfica 6, se observa la integración de la masa de agua evaporada que describe una línea constante. Esto debido a que la temperatura que corre en el interior del secador es constante y que el periodo de secado es relativamente corto, por lo que las otras variables de entrada tienen pequeños gradientes.



**Gráfico 6** MASA DE AGUA EVAPORADA: Corrida 2 a 65 °C y velocidad del aire a 0.1 m/s

Fuente: Impresión de resultados de TRNSYS

## Conclusiones

Se presentó un modelo simplificado de secador de carne tipo batch. Se realizaron 2 corridas para comparar los tiempos de secado cambiando la temperatura, en una corrida usando temperatura ambiente como comúnmente se usa para el secado tradicional exponiendo el producto un flujo de aire a temperatura de bulbo seco, y la otra corrida usando 65 °C ambas a una velocidad de 0.1 m/s.

Tomando en cuenta estos resultados respecto al tiempo de residencia del producto en el secador y en base a la información documentada sobre el secado de carne, sobre la sensibilidad de la carne a la descomposición por tiempos prolongados de secado, descartaremos utilizar la temperatura ambiente para cálculos futuros.

Gracias a los resultados obtenidos en estas simulaciones se puede obtener grandes ahorros de energía al usar temperatura de 65 °C y una velocidad de 0.1 m/s.

Además del tiempo de secado, se espera obtener el consumo de energía necesaria para lograr el secado, esto tomando en cuenta las diferentes temporadas del año donde varía la humedad del aire.

## Referencias

- Gerard. (1991). Tecnología de carne y de los productos cárnicos. ACRIBIA EDITORIAL.
- Belessiotis, V., & Delyannis, E. (2011). Solar drying. *Solar Energy*, 85(8), 1665–1691. doi:10.1016/j.solener.2009.10.001
- Tang, R., & Etzion, Y. (2004). Comparative studies on the water evaporation rate from a wetted surface and that from a free water surface.

Building and Environment, 39(1), 77–86.  
doi:10.1016/j.buildenv.2003.07.007

Martin-Domínguez, I. R. (2004). Desarrollo de un simulador para la optimización termoeconómica de viviendas de interés social. <http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Montevideo/pdf/ED-Guiasecaderosolar.pdf>

Almada, M., Cáceres, M. S., Machaín-Singer, M., & Pulfer, J. (2005). GUIA DE USO de secaderos solares para fruta, legumbres, hortalizas, plantas medicinales y carnes. Paraguay: CEDESOL INGENIERIA.

Fuller, R. J., Lhendup, T., & Aye, L. (2005). Technical and financial evaluation of a solar dryer in Bhutan. *Victoria*, 1–8.