

## **SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TERMICO DE UN SECADERO SOLAR TIPO TENDALERO**

**M. Watkins, A. Iriarte<sup>1,2</sup>, S. Bistoni<sup>2</sup>**

Facultad De Ciencias Exactas y Naturales – Universidad Nacional de Catamarca  
Av. Belgrano 300 – 4700, Catamarca, Argentina. E-mail: [watkinsmarcelo@gmail.com](mailto:watkinsmarcelo@gmail.com)

**RESUMEN:** El trabajo muestra un modelo matemático y la simulación del comportamiento térmico de un secadero solar tipo “Tendalero”, con convección natural y chimenea, construido y ensayado en INTA, Catamarca. El mismo consta de un colector solar, cámara de secado y chimenea con ganancia directa de radiación solar. El flujo de aire se determinó considerando la variación de la densidad del aire con la temperatura. Para la simulación se emplea el software Simusol. Los ajustes del modelo se realizaron sobre la temperatura del aire a la salida de la chimenea y empleando datos obtenidos durante los ensayos del prototipo experimental. El modelo ajustado se utiliza para ensayar modificaciones en la geometría del tendalero respecto a la chimenea, a fin de optimizar la eficiencia del mismo. El modelo matemático respondió satisfactoriamente y permitió simular el sistema, verificando el flujo calculado. El proceso de ajuste del modelo resultó satisfactorio con un error porcentual promedio para las 10 horas del 2,3 %, y un error cuadrático medio de 1,07 °C.

**Palabras clave:** secadero solar, simulación, Simusol.

### **INTRODUCCIÓN**

El aumento del precio de los combustibles y la reciente situación de escasez genera la necesidad y la búsqueda de nuevas tecnologías con el fin de reemplazarlos. El secado de frutas hortalizas y madera son aplicaciones típicas en las que se está utilizando la energía solar en reemplazo de los combustibles convencionales. Existen numerosos diseños de secaderos solares de distinta complejidad, especialmente en lo que se refiere a la tecnología de secaderos con convección natural. De todos ellos el secadero tipo tendalero es fácil de construir, económico y aceptado en general por los productores minifundistas del noroeste argentino (Ramana Murthy, 2009, Iriarte *et al.* 2009).

En trabajos anteriores se hicieron modificaciones a un secadero tipo tendalero para mejorar la eficiencia del sistema (Iriarte A. *et al.* 2009); posteriormente se le agregó una chimenea solar para aumentar el flujo de aire a través del producto (Iriarte A. *et al.* 2010). Otra aplicación de las chimeneas es la ventilación natural en los edificios, con el fin de mejorar la calidad del aire en el interior y aumentar el índice de confort para los habitantes (Bansal *et al.* 1993).

Estas chimeneas solares difieren de las chimeneas convencionales en que su pared norte (en el hemisferio sur). Esta es sustituida por una lámina transparente de plástico o vidrio que permite la colección de la irradiación solar. Muchas de los diseños (Ramana Murthy, 2009), especialmente en las dos últimas décadas, han puesto de manifiesto las ventajas del uso de chimeneas solares por su bajo costo de fabricación, mantenimiento y una excelente durabilidad.

Las chimeneas solares deben ser diseñados de tal manera que la pérdida de presión sean pequeñas comparadas con la diferencia de presión generada por la temperatura en la chimenea. Por lo general, las caídas de presión en sistemas de flujo natural debido a la fricción de la pared del conducto es insignificante, por lo tanto hay que poner énfasis en reducir al mínimo la velocidad con la que el aire se enfría con respecto a la temperatura ambiente.

Algunos secaderos tienen chimeneas muy cortas (<0,10 m) por encima de la cámara de secado, Jairaj K. *et al.* 2009, lo que resulta una diferencia de presión muy baja. Si se considera que el flujo de pérdida de calor dentro de la chimenea es el que determina la altura óptima, un aporte de calor externo permitiría tener chimeneas cortas y evitar que el aire dentro de la chimenea se enfríe y se iguale con el ambiente.

En los secaderos que emplean la convección natural, particularmente chimeneas solares, como principio de funcionamiento, se puede inferir que el movimiento ascendente del aire en el interior del secadero arrastra la humedad del producto. La medición directa del flujo másico dentro del secadero, resulta muy compleja. Sin embargo, es posible determinarla con aproximación empleando técnicas de modelado y simulación. Resulta necesario desarrollar un modelo matemático apropiado que se adapte a la configuración física del dispositivo y que pueda validarse posteriormente.

El software SIMUSOL (Saravia y Saravia, 2000) se adapta fácilmente a la simulación de los sistemas térmicos en general (Watkins *et al.*, 2007; García *et al.*, 2007).

---

<sup>1</sup> Investigador del CONICET

<sup>2</sup> Fac. de Ciencias Agrarias, UNCa

Para la construcción del circuito térmico del tendalero se utilizó la técnica denominada “modelos alternativos simplificados” que potencia las características del Software Simusol y que fuera presentada y aplicada en trabajos anteriores (Watkins e Iriarte, 2008; Watkins *et al.*, 2008; Watkins *et al.*, 2010).

En el presente trabajo se realiza una descripción del secadero, se detalla el circuito térmico en el entorno del SIMUSOL y se realiza el ajuste de la temperatura del aire a la salida de la chimenea con la temperatura del aire determinada experimentalmente. Se verifica el flujo másico en función del tiempo y se analiza el comportamiento de la chimenea para diferentes alturas.

## MATERIALES Y MÉTODO

Los ensayos necesarios para validar el modelo se llevaron a cabo empleando un dispositivo constituido por tres partes principales: a) el colector, b) la cámara de secado y c) la chimenea solar, ubicado en el Campo de Ensayos y Homologación de equipos de Energía Renovables, Estación Experimental de INTA- Sumalao, Catamarca.

La fig. 1 es un esquema del secadero solar. El aire entra al colector por la parte inferior frontal a través de una abertura de 0,15 m de altura. La placa colectora está conformada por piedras graníticas seleccionadas y pintadas de negro. Tiene 6 m de largo y se extiende 1,50 m hacia adelante en la cámara de secado. La cámara de secado está sobre el colector (0,80 m x 1,20 m) y posee un enrejado de alambre tensado, sobre el cual se apoyan las bandejas. La cara posterior del secadero se construyó con plástico negro para favorecer la absorción de calor. La chimenea está construida como muestra la Fig. 1: tiene un espesor de 0,15 m y una altura de 0,50 m y se extiende a lo largo de los 6 m del secadero. El aire sale por una abertura de 0,12 m construida en la parte superior de la chimenea.

Todo el sistema está construido en plástico transparente y postes de madera, Fig 2.

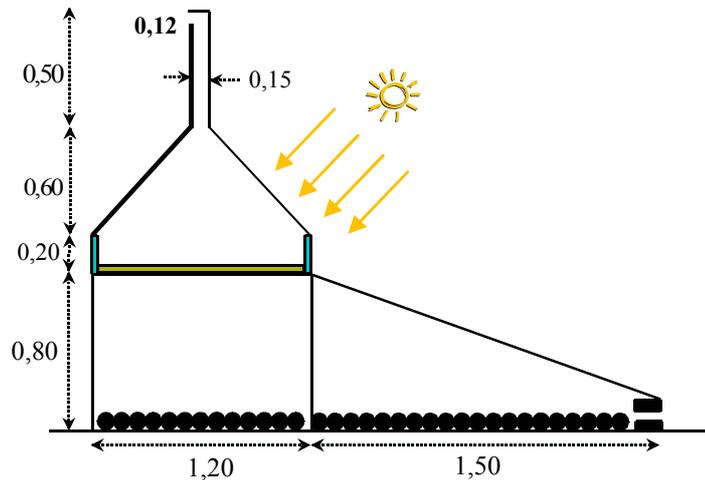


Figura 1. Corte lateral del secadero tendalero



Figura 2. Prototipo en construcción  
**Modelo matemático**

Para determinar el flujo de aire se seleccionó el procedimiento de cálculo propuesto por Maroto J. *et al.* (2008) que tiene validez solo cuando el flujo es laminar. Se calcula el caudal de aire que se desplaza por convección natural debido a la variación de la densidad del aire con la temperatura.

$$Q_v = C \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h \cdot \frac{T_{in} - T_{out}}{T_{in}}} \quad [1]$$

El coeficiente de pérdida de carga adoptado para la misma es determinado y ajustado a 0,70 (Bistoni *et al.*, 2011). Para obtener el flujo másico se multiplica ecuación [1] por la densidad del aire:

$$Q_p = \delta \cdot Q_v \quad [2]$$

La densidad del aire varía con la temperatura, por lo que se emplea una aproximación polinómica de segundo grado para su cálculo. Si bien las temperaturas varían a lo largo del recorrido del aire, se toma la temperatura media del mismo con lo que se obtiene la densidad media del aire en el interior del secadero, ecuación [3], (Cronin D. 1965):

$$\delta = 0.00002 T^2 - 0.0046 T + 1.2244$$

Debido a que la fórmula empleada para el cálculo del caudal es válida solo en régimen de flujo laminar, fue necesario verificar que el número de Reynolds ( $R$ ) es menor a 3000 en todo instante de la simulación (Maroto, J. *et al.* 2008). La fórmula empleada para el cálculo del número de Reynolds es, ecuación [4], (Duffie y Beckman 1980):

$$R = \frac{\delta \cdot D \cdot v}{\eta} \quad [4]$$

Los valores de la viscosidad del aire se calculan mediante una aproximación polinómica lineal dado que la misma depende de la temperatura, ecuación [5], (Cronin D. 1965):

$$\eta = 5E - 7 T + 0.0002 \quad [5]$$

La velocidad de desplazamiento del aire en el secadero se calcula empleando el caudal másico dividido por el área de paso del fluido.

$$v = \frac{Q_p}{A} = \delta \cdot C \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h \cdot \frac{T_{in} - T_{out}}{T_{in}}} \quad [6]$$

Es claro que las velocidades más altas se producen en la salida del aire caliente en la chimenea, y es precisamente en esa sección donde el flujo puede entrar en régimen turbulento.

#### *Simulación con Simusol*

El circuito térmico para la simulación se muestra en la Fig. 3. El circuito principal está constituido por los flujos de aire 1 y 2 que conectan a los siguientes nodos: nodo 1 representa a la temperatura ambiente o de entrada del aire; nodo 2 la temperatura media del secadero y nodo 3 la temperatura de salida del aire.

El cálculo del caudal másico del aire para dichos flujos se realiza en el cuadro FUNCIONES, y la función ingresada se denomina QFLUJO. Las variables que intervienen en dicho cálculo son la temperatura de entrada del aire, la temperatura de salida y la densidad media del fluido. Las temperaturas se ingresan en el cuadro TABLAS\_ARCHIVO ya que se trata de datos obtenidos en forma experimental. La densidad se calcula previamente con la ecuación [3] y luego se ingresa también como Tabla.

El resto del circuito térmico tiene en cuenta ganancias y pérdidas de calor en el tendalero. El nodo 4 y su condensador asociado 3 representan al lecho de piedra que constituye el piso del tendalero. Sobre dicho nodo incide la radiación solar simulado mediante el flujo de calor 4. Las resistencias 2 (conductiva) constituye las pérdidas de calor hacia el suelo y las resistencias 5 (radiativa) y 1 (convectiva) simulan la transferencia de calor hacia el espacio interior del tendalero.

Una tercera sección del circuito ubicada a la derecha en el gráfico, Fig. 3, constituye la cobertura de plástico del secadero. Sobre el nodo 5 incide la radiación solar representada por el flujo de calor 5. La resistencia 3 (convectiva) representa la transferencia de calor hacia el nodo 3 que está a la temperatura de salida del aire, mientras que las otras resistencias (4 y 6) representan las pérdidas hacia el ambiente.

Finalmente se agregaron los nodos 6 y 7 que permiten ingresar los valores de la densidad y de la temperatura de salida experimental, necesarias para el cálculo de QFLUJO.

El ajuste y validación del circuito se realiza comparando la temperatura de salida simulada con la temperatura de salida experimental. Se emplea para realizar el ajuste de la simulación el parámetro Pabs (absorción de calor) el cual toma finalmente un valor de 0,65.

En el cuadro “RESULTADOS” se configura Simusol para que genere datos de todas las temperaturas durante la simulación y el flujo de aire J1. En el cuadro de GRAFICOS se solicita las curvas de variación de la temperatura de salida simulada y experimental y las curvas del flujo de aire, con la altura de la chimenea como parámetro.

Se asigna un valor de 9 para el coeficiente de convección del aire adentro del tendalero y de 12 afuera del mismo. Dichos valores permiten ajustar satisfactoriamente el modelo.

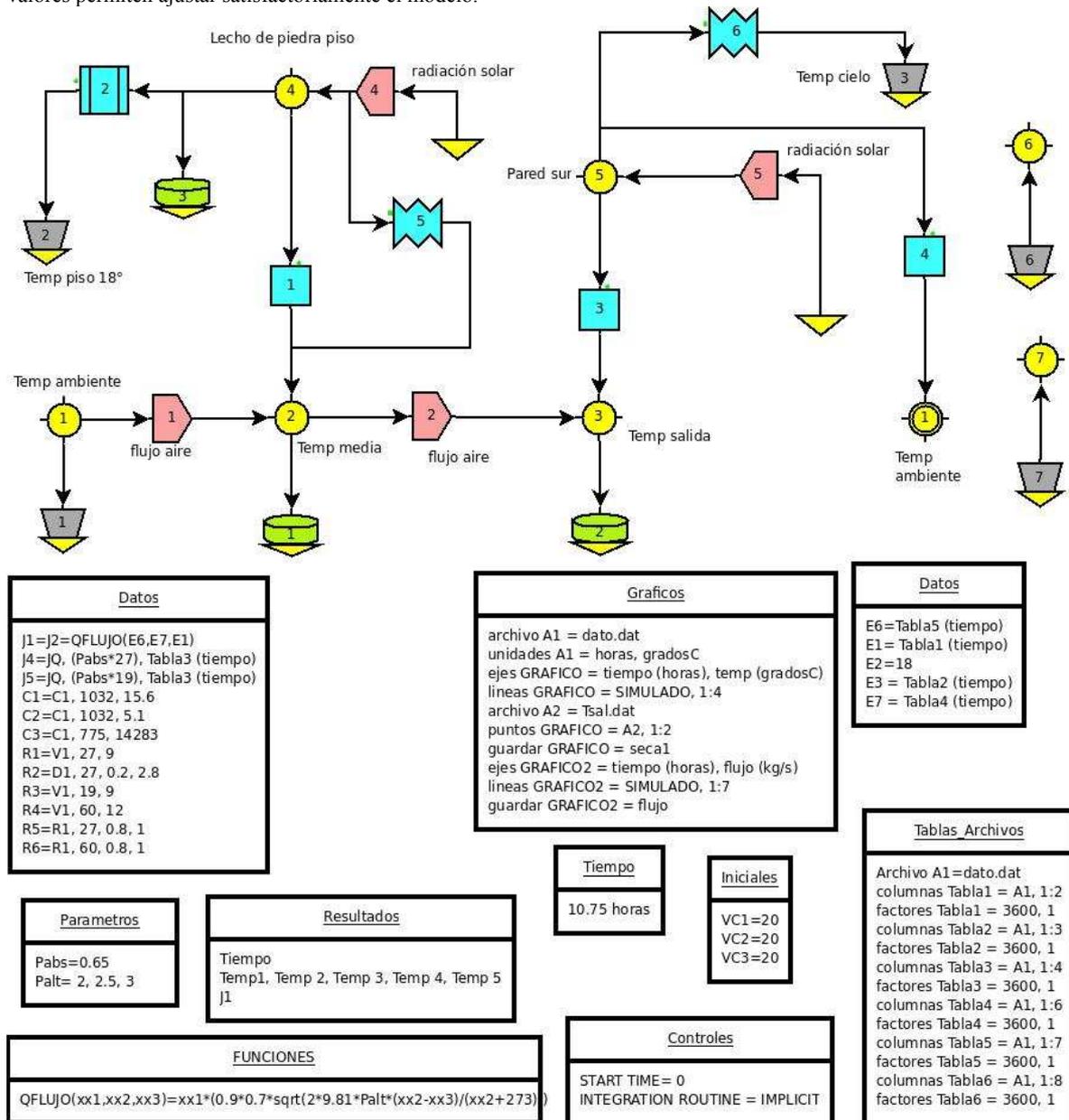


Figura 3. Diagrama generado por DIA para la simulación del sistema.

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La curva de ajuste de uno de los ensayos se muestra en la Fig.4. La línea continua corresponde al resultado de la simulación, mientras que los puntos se corresponden a datos experimentales.

En el proceso de simulación se tiene como variable de ajuste la absorción de radiación de las superficies, y se emplea como variable a verificar la temperatura de salida del aire en la chimenea. El flujo másico de aire caliente se calculó mediante la ecuación [1]. Los datos experimentales se compararon estadísticamente con los de la simulación a fin de determinar el correcto ajuste. El error porcentual promedio para las 10 horas de datos medidos es del 2,3 %, mientras que el error cuadrático medio es RMSE = 1,07 °C. Es preciso destacar que el ajuste del modelo se hizo con una altura del secadero, incluida la chimenea, igual a la del modelo experimental (2,1 m).

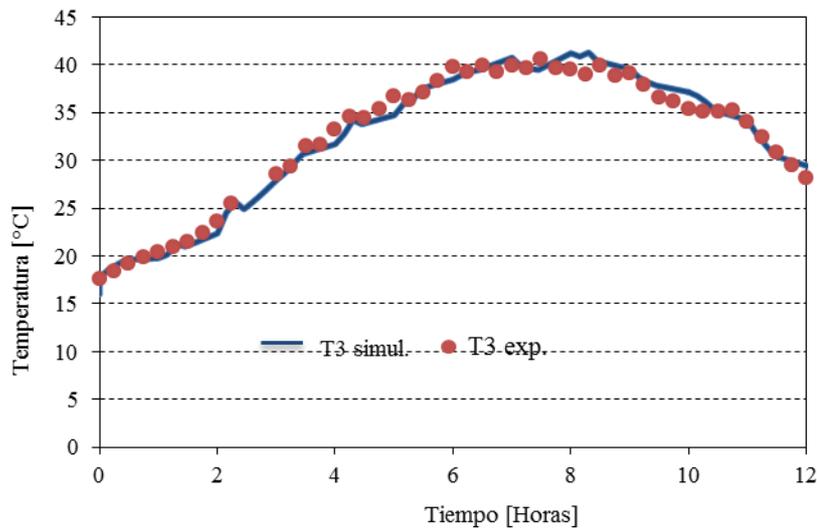


Figura 4. Curvas de temperatura de salida del aire experimental y simulada

Con el objeto de estudiar la influencia de la altura de la chimenea en el caudal del flujo de aire se incorporó a la simulación un parámetro denominado Palt. Se compararon tres alturas diferentes del secadero, incluida la altura de chimenea: 2 m, 2,5 m y 3 m. Los resultados pueden verse en la Fig. 5. Para las tres configuraciones ensayadas se verificó si el régimen era laminar.

Las variaciones de la densidad y de la viscosidad no son significativas y por lo tanto no inciden de modo determinante en el resultado final. Como en ninguno de los casos el número de Reynolds supera los 3000, el flujo es laminar para las tres alturas consideradas. Los valores resultantes pueden verse en la Tabla 1:

Altura (m)	Diámetro eq. (m)	Velocidad (m.s <sup>-1</sup> )	Viscosidad (Kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> )	Reynolds
2	0,3784694	0,807333	0,000224	1432
2,5	0,3784694	0,902625	0,000224	1601
3	0,3784694	0,988777	0,000224	1754

Tabla 1: Número de Reynolds calculado para las tres alturas ensayadas.

Dado que el número de Reynolds crece proporcionalmente con la velocidad de desplazamiento del aire, se calculó dicho indicador solo para las velocidades son máximas en cada simulación. Dicha situación se produce a las 3,75 horas desde el inicio, tal como puede verificarse en el gráfico del caudal (Fig. 5).

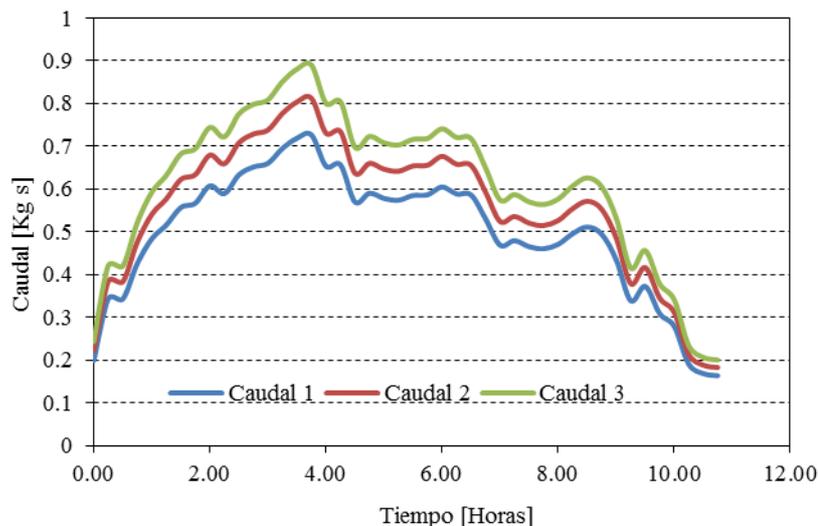


Figura 5. Curvas del flujo de aire para tres alturas de chimenea.

De los resultados de la simulación, se observan muy pequeñas variaciones en la temperatura de salida del aire al modificar la altura de la chimenea. Esto se debe, a que la temperatura depende fuertemente de la radiación solar y de las superficies de captación de calor de todo secadero. Estas superficies no se modifican cuando se varía la altura de las chimeneas, excepto lo que corresponde a la misma, que por otro lado no es significativa con respecto al resto de la superficie. Esto explica, que para una variación de altura del secadero del 33 %, la velocidad varía un 18 %.

## CONCLUSIONES

El modelo se considera válido para realizar algunos ajustes en las dimensiones del secadero. La simulación permitió verificar que el valor del flujo másico dentro del secadero es el mismo que el calculado teóricamente, comprobándose que el efecto chimenea permite aumentar el flujo de aire dentro del mismo. Además es una herramienta útil a la hora del diseño. Se considera que este ajuste está dentro de los niveles razonables y es muy similar a los errores experimentales.

La variación de la altura del secadero, particularmente de la chimenea, cuando tiene ganancia directa, no tiene un beneficio importante, si se tiene en cuenta los mayores costos que significa aumentar la chimenea.

## REFERENCIAS

- Bansal N. K.; Marthur R. y Bhandari M. (1993). Solar Chimney for enhanced Stack ventilation, Building and Environment Vol. 28 N° 3 pp 373-377.
- Bistoni, S., Watkins M., Iriarte A., Luque V., Sanchez H. (2011) – “Secadero con chimenea solar” – VII Jornadas de Ingeniería del NOA – Catamarca – En prensa.
- Cronin, D. J. (1965). Temperature and pressure dependence of viscosity of gases. Am. J. Phys. 33 pp. 835-840
- Duffie J.A. y Beckman, W.A. (1980). Solar Engineering of Thermal Processes. Edit. John Wiley & Sons
- García V., M. Gea, M. Watkins, y A. Iriarte, (2007). Integración de modelos para la simulación de una cámara de producción de plantas con aporte solar y auxiliar. Revista Avances E. Renovables y Medio Ambiente, Vol. 11, pp. 8.131 – 8.138.
- Iriarte A., C. Rodríguez, V. García y V. Luque. (2009). Secadero de productos agrícolas tipo tendalero transformado en secador solar pasivo. Avances en energías renovables y medio ambiente, Vol. 13, pág. 02.01-09.
- Iriarte A., S. Bistoni, V. Luque, M. Lara y L. Brizuela. (2010). Secadero tendalero con chimenea solar. Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 14, pág. 2.01- 2.08.
- Jairaj K., Singh S. and Srikant K. (2009). A review of solar dryers developed for grape drying. Solar Energy 83, 1698-1712
- Janjaia S., N. Srisittipokakuna and B. Balab. 2008 Experimental and modelling performances of a roof-integrated solar drying system for drying herbs and spices. Journal of Energy 33: 91–103.
- Maroto, J. A., de Dios J., de las Nieves F. J. (2008) – “Estudio experimental de régimen laminar y turbulento” - Revista Española de Física, Vol. 13, N° 5, pág. 42-47.
- Ramana Murthy M.V. (2009). A review of new technologies, models and experimental investigations of solar driers. Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol 13, pp. 835–844.
- Saravia L. y Saravia D. (2000). Simulación de sistemas solares térmicos con un programa de cálculo de circuitos eléctricos de libre disponibilidad. Revista Avances en Energías Renovables y M.A., Vol. 4, pp. 8.17 – 8.23.
- Watkins M., V. García, A. Iriarte, (2007). Aplicación de Simusol para el diseño de sistemas de calefacción sol-gas con control automático. Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 11, pp. 2.31 – 2.36.
- Watkins M., A. Iriarte, (2008). Ajustes preliminares de modelos alternativos para diseño y simulación de invernaderos solares. Revista CIENCIA – Facultad de Ciencias Exactas y Naturales – UNCa – pp 123-130
- Watkins M., A. Iriarte, S. Bistoni (2008). Diseño y análisis de sensibilidad de invernaderos solares para producción de nogales. Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 12, pp. 2.13 – 2.20.
- Watkins M., Bistoni S., Salazar G. (2010). Ensayo y simulación de un sistema de agua caliente solar termosifónico experimental. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente - Vol. 14, pp 8.39 – 8.46

## NOMENCLATURA

$Q_v$	caudal volumétrico en la chimenea ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )
$Q_p$	Caudal másico en la chimenea ( $Kg \cdot s^{-1}$ )
$A$	área de la sección transversal del conducto, ( $m^2$ )
$C$	coeficiente de pérdida de carga
$g$	aceleración de la gravedad ( $m \cdot s^{-2}$ )
$h$	altura de la chimenea (m)
$T_{in}$	Temperatura media de salida de los gases (K)
$T_{out}$	Temperatura externa o de entrada de los gases (K)
$T$	Temperatura media de los gases (C)
$\eta$	Coefficiente de viscosidad del aire ( $Kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ )
$D$	Diámetro equivalente del tubo o chimenea (m)
$\delta$	Densidad ( $Kg \cdot m^{-3}$ )
$v$	Velocidad del aire ( $m \cdot s^{-1}$ )

**ABSTRACT:** The work shows a mathematical model and simulation of thermal behavior of a natural convection solar dryer, type "Tendalero", with chimney, built and tested at INTA, Catamarca. It consists of a solar collector, drying chamber and chimney with direct gain of solar radiation. The air flow was determined by considering the change in air density with temperature. For the simulation software is used Simusol. The adjustment were performed on the air temperature at the outlet of the chimney, using data of the experimental prototype. The adjusted model was used to test changes in the geometry of dryer respect to the chimney, to optimize efficiency. The mathematical model allowed the simulation of the system, verifying the calculated flow. The adjustment process was satisfactory with an average percentage error, at 10 hours, of 2.3% and a RMSE of 1.07 ° C.

**Key words:** solar dryer, tendalero, simulation, Simusol.