

# DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE UN PROTOTIPO PARA EL ESTUDIO DEL PROCESO DE SECADO

D. Villa<sup>1</sup>, A. Bonomo<sup>2</sup>, T. y V. Passamai<sup>3</sup>.

1, 2. Instituto de Investigaciones para la Industria Química (INIQUI)

3. Instituto de Investigaciones en Energías No Convencionales (INENCO)

3. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

1, 2, 3. Consejo de Investigaciones de la UNSa – CIUNSa C.P. 4400 – Salta

Tel. 0387-4255346 E-mail: davilla7@hotmail.com

**RESUMEN:** Se presenta el diseño y dimensionamiento de un secadero experimental que puede ser utilizado para el secado de múltiples productos y la obtención de sus respectivas curvas de secado. El equipo se desarrolló para el estudio del secado de pastas alimenticias pero se presentan resultados de evaporación de agua y secado de tomate. El mismo permite fijar las condiciones del aire de entrada, mediante la regulación de la temperatura y la humedad, logrando así simular distintas estaciones del año, e incluso reproducir variaciones del día a la noche. También es posible regular la velocidad de flujo de aire sobre el producto a secar. Con la regulación de las variables del proceso, se pueden determinar las condiciones óptimas para el secado de los productos en estudio. En una de las bocas de entrada se prevé la incorporación de un colector solar como fuente de energía alternativa.

**Palabras clave:** Secado, secadero, energía térmica, temperatura, humedad.

## INTRODUCCIÓN

El proceso de secado depende de las condiciones ambientales inmediatas alrededor del producto que se seca. En ASADES se han presentado, desde hace varios años atrás, distintos prototipos para el acondicionamiento, calefacción y/o deshumidificación del aire, ya sea con vistas para su uso en el proceso de secado, como para el acondicionamiento de espacios para vivienda, tanto con inclusión de energía radiante como sin ella (1978: Saravia et al.; Lara et al.; 1986: Echazú et al.; Ribera et al.; Passamai y Correa; Iriarte et al.; Cardón et al.; Busso et al., 2001 y Saravia et al., 2007). Siguiendo la tendencia desarrollada a lo largo de los años, se incorpora en este trabajo un aporte más, el uso de materiales de construcción y sensores diferentes a los usados con anterioridad, además del objetivo específico de que se trata de estudiar el secado de fideos para una fábrica de pastas, lo que implica un producto distinto a los tradicionales (normalmente vegetales o, eventualmente, minerales). No obstante se muestran resultados de secado de tomate al igual que en otros trabajos presentados en ASADES (2005: Passamai. et al.) También, la escala de laboratorio es un tanto menor que la habitual, ya que se ocuparán pequeñas muestras, del orden de las decenas de gramos.

El secador experimental, permite obtener curvas de secado de diversos productos, mediante el acondicionamiento previo del aire de entrada al recinto y el que luego será reacondicionado para la operación de secado en función del producto que se trate. Por lo tanto, contamos con un aire de entrada y otro del proceso. Se detallan los materiales utilizados, se justifica la disposición de los mismos y se presentan planos en dos y tres dimensiones, además de fotografías del sistema.

Las variables relevantes del proceso son: pérdida de peso de la muestra, tiempo de secado, velocidad del aire del proceso, temperatura y humedad del aire de entrada y de proceso. Estas variables serán monitoreadas mediante sensores específicos que se detallan en la sección correspondiente. El equipo permite modificar las variables independientes (velocidad del aire de proceso, temperaturas y la humedad del aire de entrada) y, con una combinación adecuada de estas, es posible controlar el proceso a través de las variables dependientes (tiempo de secado y pérdida de peso). De esta manera se optimiza el secado de alimentos específicos, como pastas frescas en general, según se mencionó antes. También es factible estudiar el secado de frutas, verduras y minerales.

Luego se presenta una descripción detallada del funcionamiento del equipo y las posibilidades del mismo para reproducir condiciones promedio de humedad y temperatura para distintas épocas del año y regiones del país. También es posible reproducir variaciones de humedad y temperatura del día a la noche. Esta versatilidad permitirá simular y optimizar las variables de proceso frente a las cambiantes condiciones ambientales y/o climáticas de cada región.

Finalmente se muestran los resultados obtenidos durante una experiencia de evaporación de agua y dos experiencias de secado de tomate bajo distintas condiciones. A pesar de trabajar con muestras pequeñas, es posible evaluar la relación del comportamiento del producto con las variables de proceso involucradas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Los materiales utilizados para el armado del equipo experimental de secado son:

- Tubos de PVC de alta resistencia, con unión deslizante, de doble labio (Auwaduct -  $\phi$ 110 mm).
- Aislación de doble capa de espuma de polietileno con film aluminizado.
- Rieles metálicos (soleras y montantes) sobre los cuales se montan los tubos.
- Una cámara de pre-acondicionamiento de aire que consta de una caja metálica aislada a la que ingresa aire caliente, o frío, desde el acondicionador de aire.
- Un acondicionador de aire (Surrey, 2100 frigorías, frío-calor).

- Una clapeta, que regula la cantidad de aire que ingresa a la cámara, además de la temperatura de la cámara.
- Un vaporizador de agua (Silfab – modelo: V11- A).
- Un humidostato (Honeywell), para regular la humedad del aire que ingresará al conducto de secado.
- Un soplador de aire (Black & Decker – Modelo: BB600) se utiliza para succionar el aire de la cámara de preparación a través de una manga aislada para luego inyectarlo en el conducto de secado.
- Una pistola de calor con regulación digital de temperatura (Bosch – GHG 630 DCE), cumple la función de fijar la temperatura de secado en el nivel deseado.
- Sensores: Termohigrómetro (Tes – modelo: 1364), Data logger HOBO de temperatura, serie U12 con cuatro termorresistencias e interfaz a PC, para las mediciones de humedad y temperatura.
- Un termómetro de mercurio (-10 a 60 °C). La velocidad del aire de secado se obtiene mediante un Termo-Anemómetro (Lutron – modelo: YK-80AS).
- Una balanza de precisión con interfaz a PC (Ohaus Traveler - modelo TA302) Las curvas de secado se obtienen mediante un censado programado, donde los datos quedan almacenados para su posterior tratamiento.
- Un colector solar como fuente de energía alternativa, convirtiendo al equipo, de naturaleza portátil, en un dispositivo de campo, además de laboratorio. Una boca de entrada ad-hoc servirá para su incorporación.

## DISEÑO Y DIMENSIONES

El diseño del equipo experimental de secado, similar a otros modelos anteriores, permite la recirculación del aire, con la incorporación de aire fresco, circunstancia de gran interés en el ámbito industrial e incluso doméstico. En la Figura 1 se pueden apreciar las partes principales del equipo. Realizado en AutoCAD, versión 2007, modelado mediante un esquema en tres dimensiones.

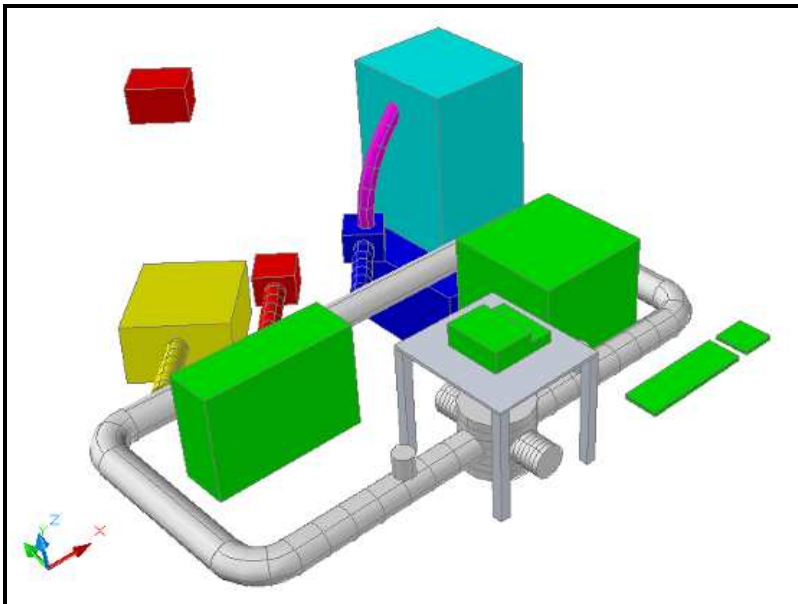


Figura 1: Modelado en 3D de secadero experimental

Un detalle e identificación de los elementos y dispositivos que conforman el equipo puede observarse en la Figura 2, realizada desde una vista superior. El sentido de circulación del aire de proceso es anti-horario.

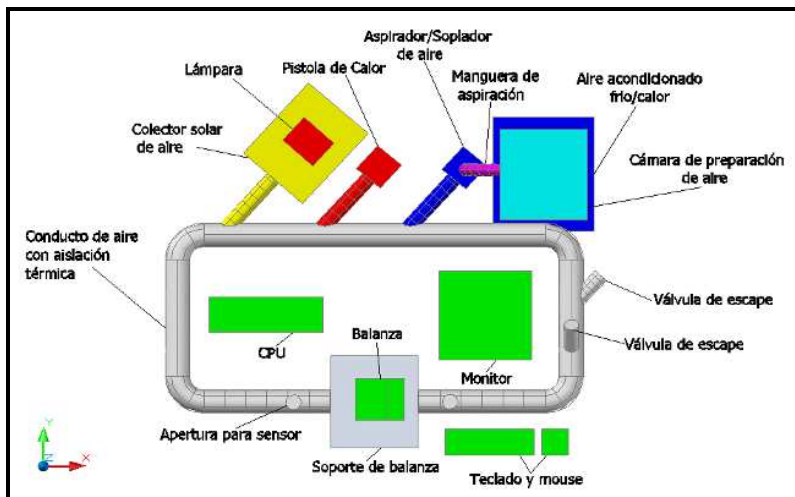


Figura 2: Vista superior - Identificación de dispositivos

En las Figuras 3 y 4 se presentan las dimensiones del equipo desde una vista superior y desde otra frontal.

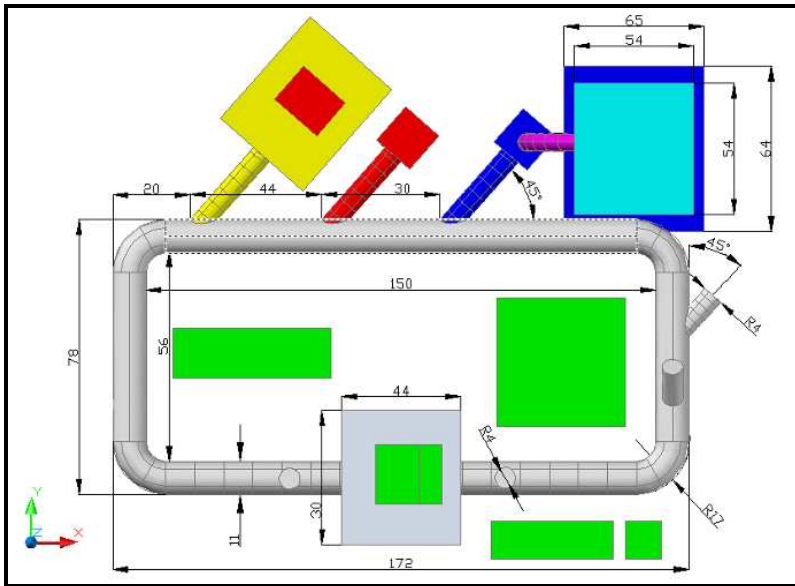


Figura 3: Cotas en Vista superior (medidas en cm)

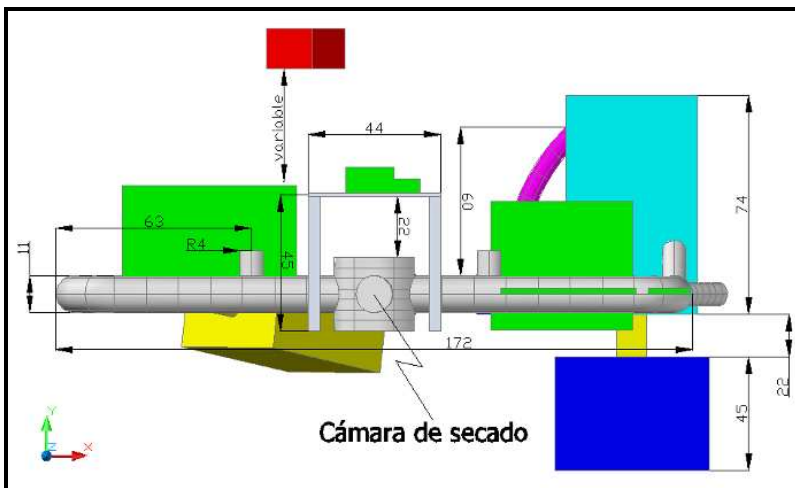


Figura 4: Cotas en vista frontal (medidas en cm)

En la fotografía de la Figura 5 se presenta el equipo ya construido, con los dispositivos que lo componen. Puede apreciarse también la aislación de los tubos de PVC.



Figura 5: Fotografía del equipo construido

La cámara de secado consiste en un ensanchamiento del conducto de secado donde se adaptó un soporte colgante directamente vinculado a la balanza. Sobre dicho soporte se colocan las muestras a secar o bien un plato porta muestra. Los detalles de la cámara pueden apreciarse en la Figura 6 a) y una fotografía de la misma en la Figura 6 b). Debido a la capacidad de la balanza, en el soporte solo pueden colocarse muestras de hasta 200 gramos. El rozamiento del soporte contra la pared de la cámara de secado fue reducido al máximo mediante un preciso centrado del mismo y la incorporación de rodamientos de teflón en contacto con las paredes de dicha cámara. Esto fue necesario por el movimiento que experimentaba el soporte debido a la velocidad del aire de secado. El soporte simula la técnica de secado en bandejas ampliamente utilizadas en la industria.

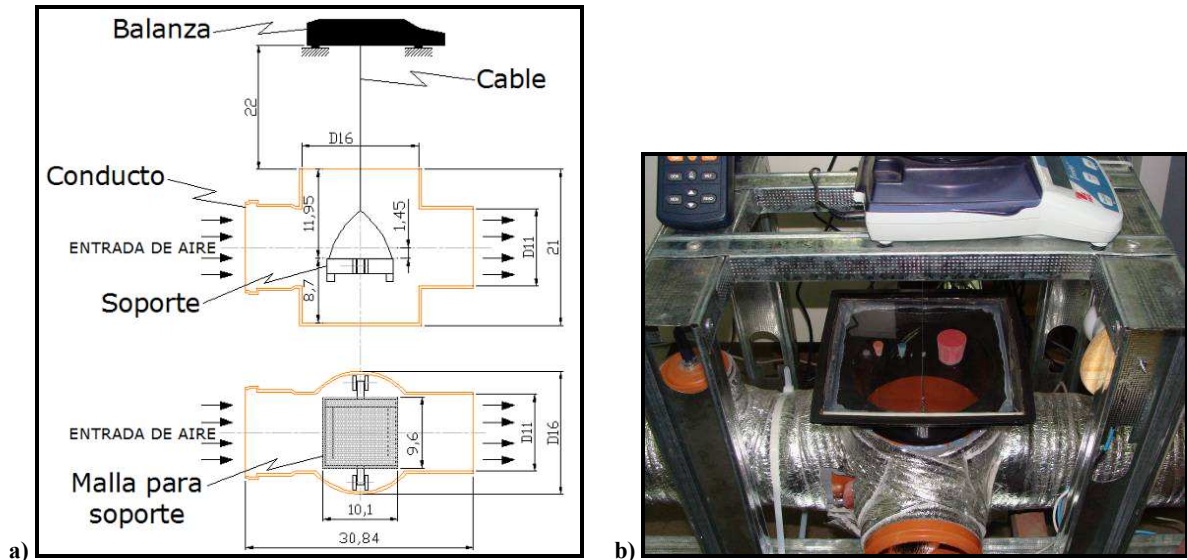


Figura 6: a) Vista frontal y superior de la cámara de secado (medidas en cm). b) Fotografía de la cámara de secado.

## FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO

El equipo se lleva a un estado estacionario durante 60 minutos, regulando los parámetros involucrados. En primer lugar se fijan las condiciones de la cámara de pre-acondicionamiento de aire, donde se establecen las características del aire que se introducirá al secador. La cámara de preparación de aire consiste en una caja metálica aislada en la que se pre-acondiciona el aire que luego ingresará al secador. El objetivo de este pre-acondicionamiento es simular las condiciones de humedad y temperatura que presenta el aire durante distintas épocas del año. Esta tarea se lleva a cabo introduciendo, en dicha cámara, aire frío o caliente proveniente de un equipo pre-acondicionador de aire y mediante un vaporizador de aire que fija la humedad. Luego de ingresar al conducto del secador este aire pre-acondicionado será, finalmente, acondicionado para el secado de las muestras en estudio.

Al encender la pistola de calor y el aspirador-soplador de aire se fija la velocidad del aire de secado. Se registran las lecturas en los sensores de humedad y temperatura, en forma manual y se establecen las condiciones deseadas de secado. Como respaldo del sensor electrónico de humedad, se utiliza un termómetro de mercurio para medir la temperatura de bulbo húmedo.

Una vez fijadas las variables de secado, se procede a tarar el soporte en la balanza y colocar la muestra de producto para luego posicionar el soporte dentro de la cámara de secado, que está vinculado a la balanza mediante un cable metálico. En ese momento se da inicio a los registros temperatura y peso de la muestra ya que el datalogger y la balanza se encuentra conectados a la PC y se dispone de ambos software para la gestión de estos dispositivos. La variación de la humedad se controla en el visor del termohigrómetro pero no se registra automáticamente ese valor. De ser necesario, en la cámara de preparación pueden simularse variaciones de la humedad y temperatura del aire de alimentación como por ejemplo las experimentadas del día a la noche.

## EXPERIENCIAS DE EVAPORACIÓN DE AGUA Y SECADO DE TOMATE

Durante el período de secado a velocidad constante puede considerarse que el agua que se evapora es agua libre, que se encuentra en la superficie del producto. A fin de evaluar el comportamiento del equipo, se presentan los resultados obtenidos para una experiencia de evaporación de agua y dos experiencias de secado de tomate, bajo distintas condiciones de funcionamiento. En el primer caso se coloca, en un recipiente aislado térmicamente, 5 gramos de agua y en los dos siguientes el producto se coloca directamente sobre la malla del soporte. El objetivo principal es comparar las curvas de secado para distintas condiciones de proceso. A partir de la medición y registro de la balanza analítica digital se grafican las curvas de Variación de Peso vs. Tiempo para los tres casos estudiados. Las tres experiencias se realizaron en días diferentes. A continuación en la Tabla 1 se presenta los registros de cada experiencia.

REGISTRO DE EXPERIENCIAS DE SECADO		Experiencia N° 1	Experiencia N° 2	Experiencia N° 3
		Producto: Agua	Producto: Tomate	Producto: Tomate
1	Temp. ambiente	15 °C	18 °C	16 °C
2	Humedad ambiente	80 %HR	50 %HR	60 %HR
3	Temp. en cámara de pre-mezcla	15 °C	18 °C	30 °C
4	Humed. en cámara de pre-mezcla	80 %HR	50 %HR	35 %HR
5	Temp. a la entrada del conducto	15 °C	18 °C	16 °C
6	Tiempo p/estado estacionario	60 min	60 min	60 min
7	Velocidad del aire	1,00 m/s	1,00 m/s	1,50 m/s
8	Caudal de aire de secado	0,0087 m <sup>3</sup> /s	0,0087 m <sup>3</sup> /s	0,0130 m <sup>3</sup> /s
9	Temp. de secado (Bulbo Seco)	40 °C	40 °C	50 °C
10	Temp. de secado (bulbo húmedo)	21 °C	20 °C	23 °C
11	Humedad de secado	20 %HR	20 %HR	12 %HR
12	Temperatura de la muestra	21 °C	- °C	- °C
13	Caudal de escape de aire	0,0037 m <sup>3</sup> /s	0,0037 m <sup>3</sup> /s	0,0055 m <sup>3</sup> /s
14	Porcentaje de escape de aire	42,45 %	42,45 %	42,45 %
15	Peso inicial	5 gr.	45,28 gr.	45,47 gr.
16	Peso final	0 gr.	16,11 gr.	7,36 gr.
17	Tiempo de la experiencia	142 min	200 min	200 min

Tabla 1: Registro de variables y parámetros de 3 experiencias de secado

El caudal que se informa en el ítem 8 de la Tabla 1 se obtiene del producto de la velocidad de aire por la sección del conducto anterior al ensanchamiento de la cámara de secado, siendo el diámetro utilizado igual a 0,105 metros. Por otra parte el caudal de escape de aire se obtiene al medir la velocidad en la boca de salida y multiplicar este valor por la sección de dicha salida.

#### Experiencia n°1

En esta experiencia de evaporación de agua (3 y 4 en la Tabla 1), la temperatura y la humedad de la cámara de pre-mezcla se establecieron en 15 °C y 80% HR y solo en este caso coincidieron con las temperatura y humedad ambientes (1 y 2 en la Tabla 1). La temperatura de entrada en el conducto (5) coincide con la de la cámara de pre-mezcla y la temperatura de evaporación (9), se fijó en 40°C mediante la regulación de la pistola de calor. La velocidad del aire de secado se estableció en 1 m/s (7) y la humedad relativa para estas condiciones fué del 20%. La curva de evaporación resultante puede observarse en la Figura 7 a) y una fotografía del recipiente en la Figura 7 b). El tiempo de operación fué de 142 minutos.

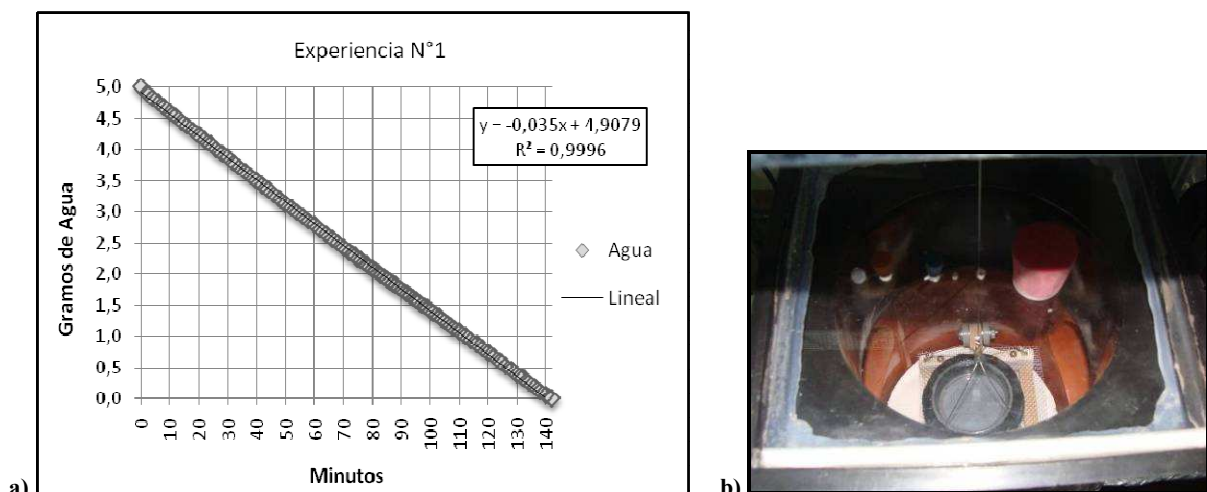
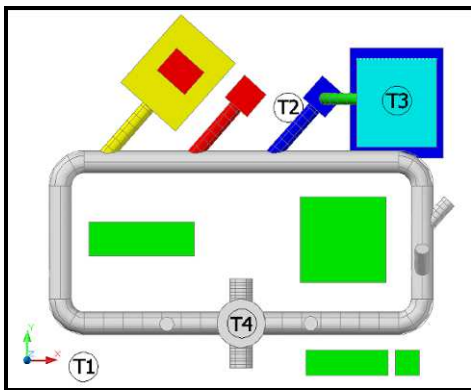


Figura 7: a) Curva de evaporación para la experiencia N°1. b) Recipiente aislado, colocado en la cámara de secado.

En la Figura 8, se presentan los puntos de medición de las 4 termo-resistencias conectadas al datalogger de temperatura con una referencia descriptiva de dichas temperaturas.

En la Figura 9, se observa la variación de temperatura vs tiempo durante los 142 minutos de duración de la experiencia N°1.



Referencias  
 T1: Temperatura ambiente.  
 T2: Temperatura a la entrada del conducto.  
 T3: Temperatura en la cámara de pre-acondicionamiento.  
 T4: Temperatura en la cámara de secado.

Figura 8: Puntos de medición de temperaturas mediante termo-resistencias

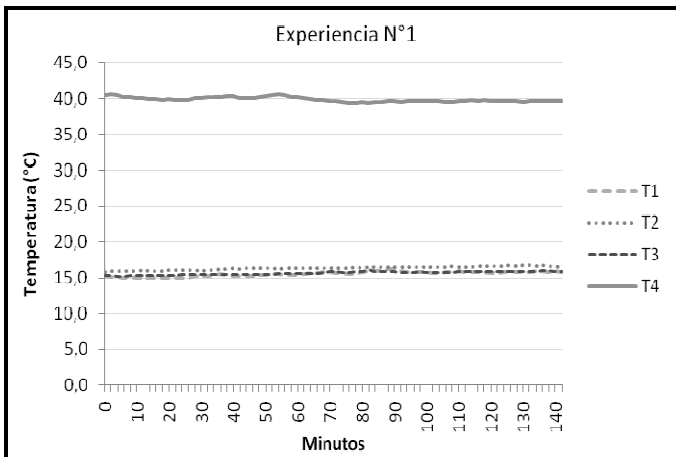


Figura 9: Variación de temperaturas vs tiempo para la experiencia N°1

Se observa que la curva de secado es prácticamente lineal, por tratarse de evaporación de agua. El tiempo de secado se presenta incrementado debido a la recirculación del aire de proceso, ya que solo el 42,45% de su caudal es extraído a través de ambas válvulas de escape. También hay que considerar que la velocidad del aire es de moderada a baja tratándose de un proceso de secado.

La variación de temperatura, presentada en la Figura 10 nos permite visualizar la sensibilidad de los sensores y apreciar la estabilidad del equipo. Las temperaturas T1, T2 y T3 son similares solo para esta experiencia y sufren un leve aumento progresivo debido al aumento de la temperatura ambiental.

Experiencia n°2

En esta experiencia la temperatura y la humedad relativa ambientales, arrojaran valores de 18°C y 50% respectivamente. La temperatura y humedad relativa de la cámara de pre-mezcla coinciden con los valores ambientales. La temperatura de secado se fija en 40°C mediante la regulación de la pistola de calor. La velocidad del aire de secado se estableció en 1,0 m/s y la humedad relativa para estas condiciones fué del 20%. La curva de secado resultante puede observarse en la Figura 10 a) y una fotografía del producto luego de 200 minutos se presenta en la Figura 10 b).

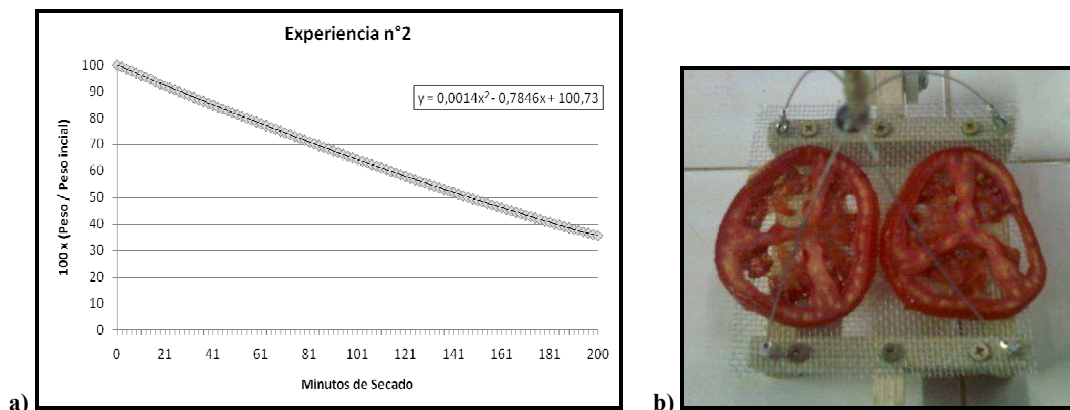


Figura 10: a) Curva de secado para la experiencia N°2. b) Fotografía del producto luego de 200 min.

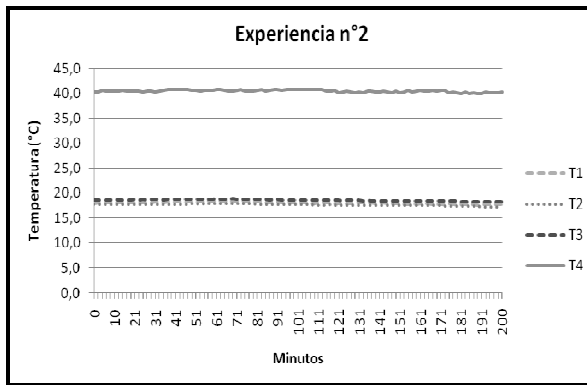


Figura 11: Variación de temperaturas vs tiempo para la experiencia N°2

En la Figura 11, las temperaturas T2, T3 y T4 son similares y su leve desfasaje se debe a diferencias de precisión en las termo-resistencias utilizadas. Como se observa en la Figura 11, la curva obtenida no presenta una variación importante en su pendiente y esto se explica por la baja temperatura y velocidad de aire utilizadas. Para los 200 minutos de proceso el porcentaje de disminución de peso solo desciende hasta 35.6 % por lo que no llega a visualizarse el punto crítico de secado a partir del cual comienza a disminuir la velocidad de secado. El reciclo fué similar al caso anterior y resulta de mantener las dos válvulas de escape abiertas al máximo. La temperatura ambiente T1 fué de 18°C y se mantuvo prácticamente constante durante el transcurso de la experiencia. La variación de la temperatura secado (T4) también fué muy leve, debido a una regulación controlada de la pistola de calor.

Experiencia n°3

En esta nueva experiencia la temperatura y humedad relativa ambientes presentaron valores de 16°C y 60% respectivamente. En este caso se utilizó la cámara de pre-acondicionamiento de aire donde la temperatura se fijó en 30°C y la humedad relativa en 35%. La temperatura de secado se fijó en 50°C mediante la regulación de la pistola de calor. La velocidad del aire de proceso se estableció en 1,50 m/s y la humedad relativa de secado fué del 12%. La curva de secado resultante puede observarse en la Figura 12 a), y una fotografía del producto luego de 200 minutos se muestra en la Figura 12 b).

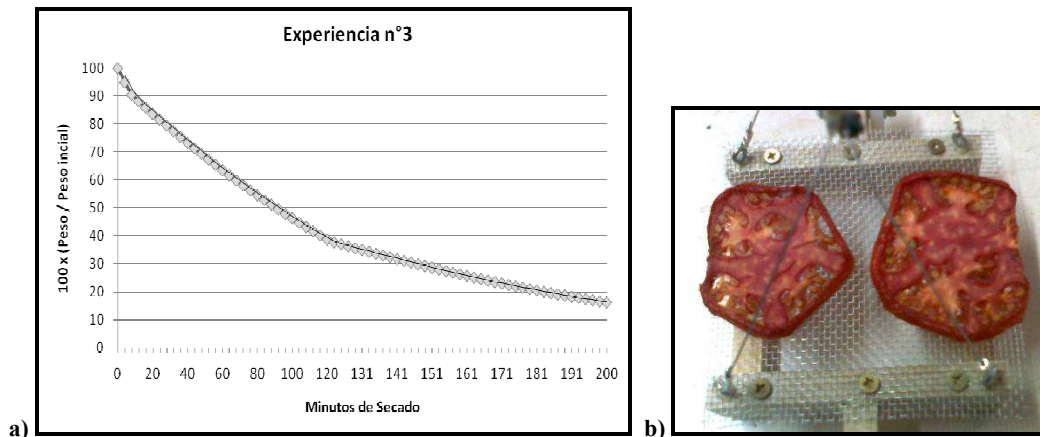


Figura 12: a) Curva de secado para la experiencia N°3. b) Fotografía del producto luego de 200 min.

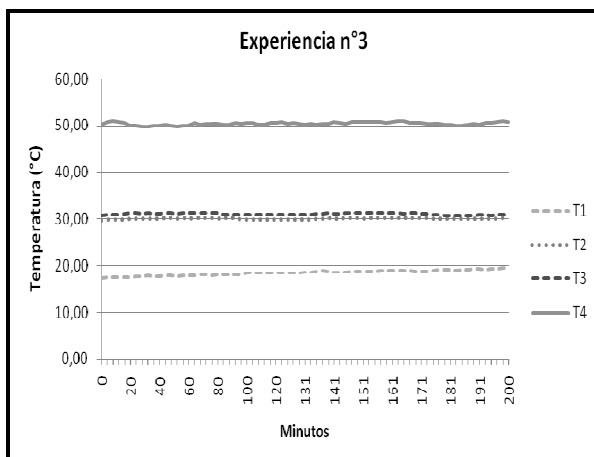


Figura 13: Variación de temperaturas vs tiempo para la experiencia N°3

Esta experiencia se realizó bajo condiciones más intensas de secado por lo que el porcentaje de humedad disminuyó hasta 16.2%. Esto se debió a una mayor temperatura de secado, una menor humedad y una mayor velocidad del aire. En la Figura 12 a) es importante notar el punto de inflexión en la curva correspondiente al punto crítico de secado a partir del cual comienza a disminuir la velocidad de secado. Este punto se registró a los 123 min y 38 % de humedad de la muestra.

Según la Figura 13, la temperatura ambiente fué aumentando levemente, situación reflejada en la variación de T1. Debido al control de la cámara de pre-acondicionamiento T2 y T3 no acompañan el aumento de temperatura ambiental, rondando los 30°C durante todo el proceso. La temperatura T4 de secado presentó leves variaciones debido a un minucioso control de la pistola de calor.

## CONCLUSIONES

El secadero experimental diseñado presenta una gran estabilidad en su funcionamiento y acusa sensibilidad ante cambios programados de sus variables. Estas condiciones permitirán evaluar el comportamiento de los distintos productos sometidos al secado, considerando los cambios de algunas o todas las variables que dominan el proceso (temperatura, humedad, velocidad del aire y tiempo).

Se destaca la versatilidad del dispositivo, debido a la posibilidad de simular las condiciones ambientales que se presentan en diferentes días del año y en distintas regiones del país.

Los dispositivos que componen este equipo experimental demostraron una gran confiabilidad en su comportamiento y fueron seleccionados o diseñados para largos periodos de funcionamiento. A medida que se fue aumentando la temperatura del aire ambiental la pistola de calor debió ajustarse en temperaturas menores a fin de mantener constante la temperatura de secado establecida. La balanza y los sensores utilizados demostraron gran sensibilidad. Estas situaciones abren la posibilidad del estudio de la eficiencia del secadero, así como del consumo energético del mismo frente a las distintas condiciones ambientales y considerando los diferentes requerimientos del producto que se desea secar.

El equipo construido permite trabajar con muestras de hasta 200 gramos, debido a la capacidad de la balanza utilizada y al espacio disponible en la cámara de secado. No obstante, los resultados de este simulador pueden extrapolarse a equipos de mayor tamaño, mediante un adecuado modelado matemático de la operación.

De las experimentaciones realizadas, se concluye que los resultados obtenidos fueron los esperados, considerando las variaciones introducidas. Como se esperaba, la experiencia de evaporación de agua presentó una curva de secado lineal que corresponde a una velocidad constante de evaporación. En cuanto al secado de las muestras de tomate es interesante notar que en la experiencia N°2 no se presentó el punto crítico debido a una insuficiente disminución del porcentaje de humedad. Sin embargo en la experiencia N°3 el punto crítico es claramente visible debido a una mayor disminución del porcentaje de humedad como consecuencia de condiciones más intensas de secado. En ambos casos los porcentajes de humedad alcanzados a los 200 min fueron menores que los registrados para secado solar en un tiempo similar (2005: Passamai. et al.).

## REFERENCIAS

- Saravia L., Alanís E., Frigerio E. y Fabris A. (1978). Secado solar de tabaco: resultados experimentales. ASADES, 4, 83-98.
- Lara M., Cortés R., Gaspar R. y Piacentini R. (1978). Secado solar de granos. ASADES, 4, 99-110.
- Echazú R., Passamai V. y Saravia L. (1986). Secado solar pasivo para pimienta. ASADES, 11, 35-38.
- Ribera D., Iriarte A., Sequi J. y Rodríguez C. (1986). Secadero solar pasivo para pequeñas unidades de producción. ASADES, 11, 47-42.
- Passamai V. y Correa D. (1986). Secadero solar híbrido de pequeña escala. ASADES, 11, 53-62.
- Iriarte A., Sequi J. y Amaya A. (1986). Secado de productos agrícolas con intercambiadores de plástico agua-aire. ASADES, 11, 63-69.
- Cardón L., Chiarito G. y Lesino G. (1986). Acondicionamiento de aire mediante deshumidificación y enfriamiento evaporativo. ASADES, 11, 125-130.
- Busso A., Sogari N., Lacelle H., Arrieta F., Tokeff J. y Leyes M. (2001). Optimización de un secadero solar de tipo gabinete: evaluación y modelización del proceso de secado y tipificación del producto seco. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, 5, 02.31-02.36.
- V. Passamai., S. Valdez., T. Passamai y S. Pareja (2005). Experiencias comparativas de secado de tomate bajo distintas condiciones. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, 9, 02.19-02.24.
- Saravia L., Alia D. y Sánchez B. (2007). El diseño de secadores solares usando las curvas de secado del producto. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, 11, 02.01-02.07.

## ABSTRACT

We present the design and sizing of an experimental dryer that can be used for drying multiple products and registration of their respective curves. The equipment was developed to study the drying of pasta, but results for water evaporation and drying of tomato are presented. The equipment allow us to fix the inlet air conditions by regulating the temperature and humidity, thus simulating various seasons, and even reproducing changes from day to night. Also, it is possible to regulate the airflow rate on the product to dry. With the regulation of process variables, the drying times can be determined as well as the drying curves and the optimal conditions for drying the products under study. One input is provided for the incorporation of a solar collector as a source of alternative energy.

Keywords: drying, dryer, thermal energy, temperature, humidity.