

## IMPLEMENTACIÓN DE UN LABORATORIO PARA EXPERIENCIAS DE SECADO BAJO CONDICIONES CONTROLADAS

L. Mealla Sánchez, M. Condorf<sup>1</sup>, L. Saravia<sup>2</sup>

INENCO<sup>3</sup> - Departamento de Física, Universidad Nacional de Salta  
 Calle Buenos Aires 177. (4400) Salta. E mail: meallal@unsa.edu.ar; Fax 5487 255489

**RESUMEN:** Se presenta un laboratorio de secado para la realización de experiencias bajo condiciones controladas, en el mismo se utiliza un banco de lámparas como simulador de la radiación solar, una cámara de secado a escala, construida con materiales de bajo costo y sencilla implementación. Se detalla los distintos elementos del equipo y se presentan las experiencias realizadas durante una practica con alumnos.

### INTRODUCCIÓN

El estudio en condiciones controladas de las variables características de un proceso de secado se torna difícil debido a que se enfrenta con variables meteorológicas. Por ello, contar con un laboratorio que permita controlar alguna de esas variables y a la vez realizar las medidas de interés sin la intervención del usuario es de importancia.

Las variables de interés en las experiencias de secado en el laboratorio son: la radiación que llega al secador, la temperatura ambiente, el área de planta del secador, el flujo de aire en el secador y la humedad ambiente. Por otra parte, se necesita medir las temperaturas de la cámara de secado y del producto depositado en ella, la humedad absoluta en la cámara de secado y las variaciones de peso del producto ubicado en la cámara de secado, para determinar las masas de agua evaporada.

En el presente trabajo se muestra el desarrollo de un equipo de laboratorio que permite mediante una computadora la adquisición de los datos de todas estas variables.

### DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

En la figura 1, se muestra un esquema con los distintos equipos utilizados en el laboratorio de secado, a continuación se describe cada componente.

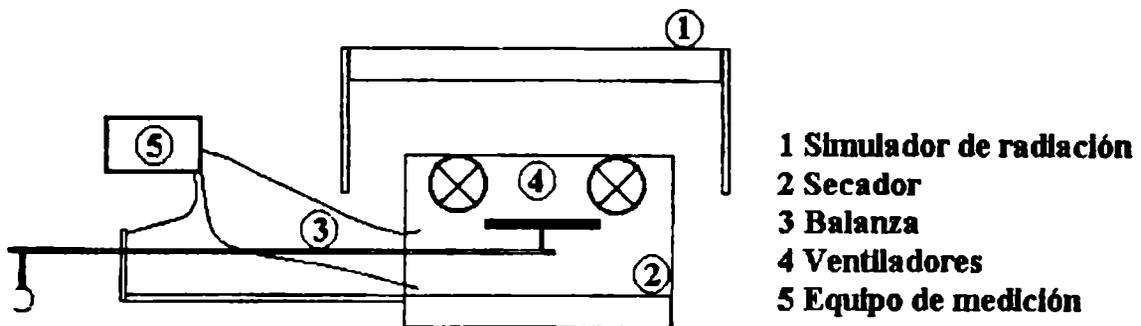


Figura 1: esquema del equipo de laboratorio.

#### Simulador de radiación

Para simular la radiación solar se utiliza un arreglo de lámparas con filamento de tungsteno distribuidas en un bastidor de 1,2 m de largo por 1 m de ancho, que fuera utilizado en una experiencia anterior (Condorf, 1991). Se utilizaron portalámparas de aluminio debido a las altas temperatura que alcanza el banco, rodeando los portalámparas se colocaron pantallas cónicas de aluminio para dirigir y mejorar la distribución de radiación sobre una superficie horizontal. Si bien es posible utilizar

Asesor del CONICET.

Investigador del CONICET.

Asesor UNSa-CONICET

lámparas microicas tipo spot, que reproducen mejor el espectro solar, estas son sensiblemente más caras que las lamparas utilizadas.

No obstante que el simulador construido emite mayormente radiación en el rango del infrarrojo y no reproduce el espectro solar, su utilización será válida para experiencias en las que sólo interese un balance global de energía, sin hacer distinción de la longitud de onda incidente.

El simulador solar ha sido diseñado para irradiar un área de  $1 \text{ m}^2$ , pero dada la pronunciada caída de radiación en los bordes se aconseja trabajar con dimensiones menores a los  $0,8 \text{ m}$  de ancho y  $1 \text{ m}$  de largo, para tener un error en la uniformidad de la radiación simulada menor al 10%. Una vista del simulador se muestra en la figura 2.

Las lámparas fueron distribuidas en seis hileras paralelas de 5 lámparas cada una, apoyadas en un soporte que posee un mecanismo que permite subir y bajar el arreglo de lámparas para así tener mayor o menor potencia lumínica en la superficie debajo de él, allí es donde se coloca el prototipo secador. Debido a que cada lámpara nominalmente consume 150 vatios, se conectó por grupos en disposición paralelo, cada grupo esta conectando a una fase distinta de la red trifasica. Para lograr una distribución uniforme en una superficie normal a la dirección de incidencia, se colocan laminas de poliestireno expandido a los costados para disminuir el efecto de borde. Así se consigue que el producto dentro de la cámara de secado tenga en gran medida radiación constante a una misma altura.

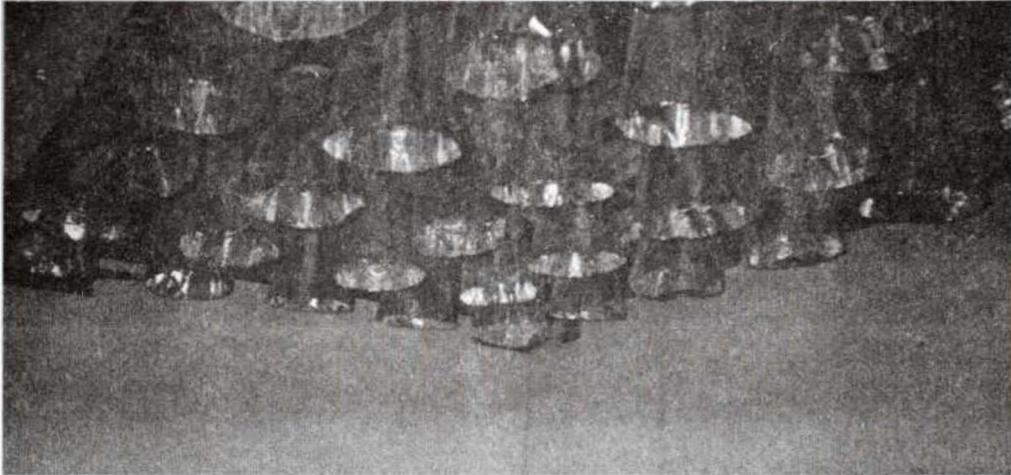


Figura 2: vista inferior del simulador solar.

La medida de radiación se realiza con un sensor marca Licor, de reducido tamaño y rápida respuesta. Al ser un sensor fotovoltaico, la señal de salida depende del espectro de la radiación a medir. Se trata de conservar el mismo a lo largo de las experiencias realizadas utilizando la misma tensión de alimentación en las lámparas. No se dispone en el laboratorio de un sensor térmico de tamaño adecuado que permita disminuir este problema.

#### **Cámara de secado**

Se construyó el prototipo de secador con paredes de plástico, similar a un secador real, usando la escala geométrica 1:100, haciendo referencia al metro como unidad de escala. En principio se utiliza como un secador de cámara simple, luego interponiendo en forma transversal al flujo una pared plástica se tiene un secador de doble cámara. El área de cubierta del prototipo es de  $1 \text{ m}^2$ , repartidos en el techo y en las paredes de un secador de sección rectangular. El prototipo se construyo con un área de  $0,25 \text{ m}^2$  por cámara, resultando un secadero de  $0,5 \text{ m}^2$  en total. Un esquema del prototipo se muestra en la siguiente figura 3.

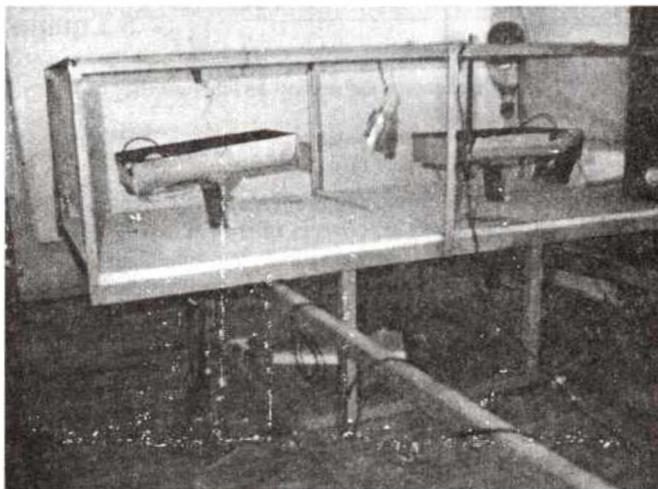


Figura 3: Cámaras de secado donde se muestra las balanzas, sensores de temperatura y cubierta plástica.

### La balanza

La variación de masa de la muestra se sensa con dos balanzas diseñadas a tal efecto (mayores detalles de la construcción, Mcalla Sánchez et al., 1998). para ello se usan dos transductores de presión y un sistema de palancas y contrapesos, que permiten la medida de variaciones pequeñas de masa. La deformación de un fuelle de goma, permite obtener variaciones de presión que son proporcionales a las variaciones de peso; las variaciones de presión son sensadas, originando una señal en tensión proporcional. De esta manera las variaciones de masa del producto pueden ser sensadas sin necesidad de mover el producto del interior de la cámara de secado.

### La circulación de aire

Para asegurar un flujo de aire uniforme sobre el producto a fin remover el agua evaporada, se instalan dos ventiladores de 1.92 W. Se regula la velocidad de aire mediante un control de tensión, permitiendo aumentar o disminuir la velocidad de giro de los ventiladores y así, la cantidad de aire impulsado. Se logra un balance entre ambos ventiladores, produciendo un perfil de aire aproximadamente uniforme.

El valor de la velocidad de aire para realizar los ensayos se obtiene del análisis del número de Reynolds respecto a un secador real. El régimen supuesto en ambos secadores es forzado y el dicho número se expresa de la siguiente manera:

$$R_e = \frac{V * D_e}{\nu} \quad (1)$$

Secado V: Velocidad del aire forzado en la cámara;  $D_e$ : Diámetro equivalente;  $\nu$ : Viscosidad cinemática.

De esta manera, suponiendo que la viscosidad cinemática  $\nu$  es la misma pues trabajamos con aire ambiente, solo queda para comparar el producto de la velocidad por el diámetro equivalente en ambos secadores, suponiendo por supuesto que ambos Reynolds tengan un valor similar. Conocida la geometría para ambos y las velocidades en el secador real, se calcula la velocidad en el modelo a escala de la siguiente manera:

$$\nu = \frac{V * D_e}{d_e} \quad (2)$$

Usualmente se emplean en un secador real velocidades de aire que van entre 0,1 y 0,5 m/s, por lo que usando la ecuación (2), se determinan velocidades dentro del prototipo que van desde 1 a 5 m/seg.

El flujo de aire se mide conociendo los valores de un área transversal del secadero y una velocidad típica dentro de él. El caudal de aire es aproximadamente constante y uniforme dentro del secadero, por lo que solo se mide la velocidad de aire a la salida y el área de salida. El flujo se obtiene multiplicando este valor por la densidad del aire a temperatura ambiente, cuyo valor aproximado es 1,161 Kg/m<sup>3</sup>.

### El equipo de medición

Para medir temperaturas, debido a las dimensiones reducidas del prototipo, se necesita un sensor pequeño, fácil de manejar y con una inercia pequeña, ya que las medidas se realizan para un instante en particular de tiempo. Como el termistor entrega a la salida una variación de tensión para una determinada variación de temperatura, y esto se basa en una variación de la resistividad del sensor, se necesita una fuente de corriente constante para asegurarnos que el termistor realice una medida sin mucho error. La corriente proporcionada por la fuente debe ser de tal orden que no se produzca calentamiento joule en el circuito y así introducir un error significativo, por lo tanto se ajusto a un valor aproximado de 16  $\mu$ A medido con carga (el termistor conectado y cerrando circuito). Todos los sensores de temperatura se recubren con una campana reflectora, de manera de que no sufran calentamiento por radiación. Los termistores para medir la temperatura del producto son aislados con una cubierta plástica para evitar la degeneración del sensor. Fuera de las cámaras se instalan sensores para medir la temperatura ambiente.

La humedad absoluta en las cámaras y en el exterior se mide a través de psicrómetros contruidos con termistores para medir las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo, los mismos fueron contrastados con un patrón. Como resultado de esto se puede afirmar que la aproximación al patrón es buena y el error de la medida de humedad absoluta se deberá al error de medición de la temperatura.

Es necesario instalar un extractor de aire para que las condiciones ambiente dentro del lugar donde se instala el prototipo sean las mismas que el exterior, esto se debe al calentamiento producido por el arreglo de lámparas que simula la radiación solar. Para ello se realiza una medida preliminar de temperaturas para calcular el flujo de aire que debe proporcionar el extractor. La evolución de la temperatura en diversos puntos, en un periodo prolongado de tiempo sigue bastante a la temperatura de entrada del aire, que es la del ambiente fuera del recinto. Por lo tanto el problema de calentamiento queda superado ya que la temperatura de salida difiere del ambiente en aproximadamente 3 °C. No es

necesario modificar la humedad, pues el contenido neto de agua en el aire desde el exterior es el que interesa. En la figura 4 se muestra esta evolución en el tiempo de la temperatura ambiente y en distintos puntos del laboratorio funcionando simultáneamente el extractor y todo el equipo de laboratorio.

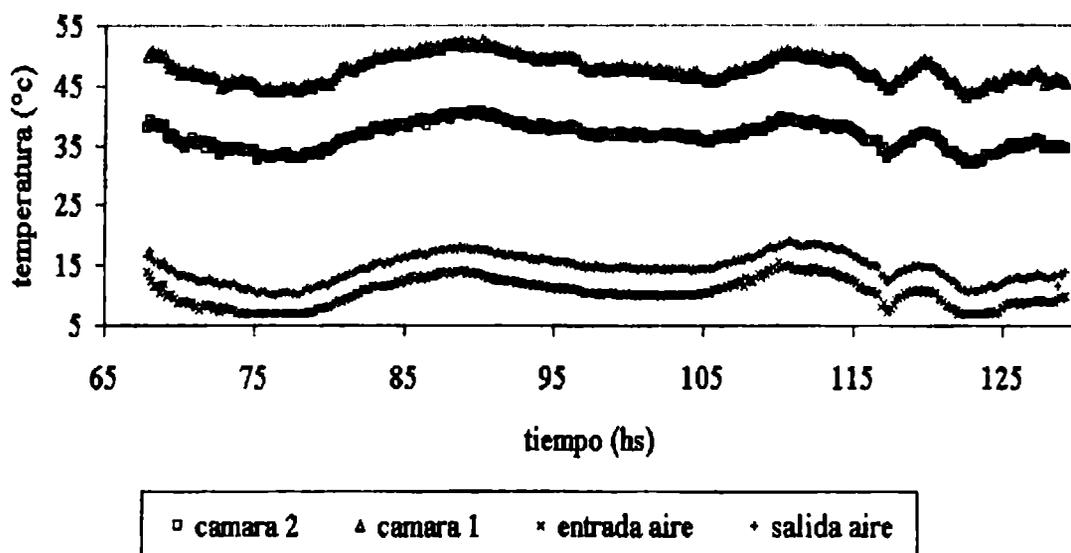


Figura 4: temperaturas ambiente y en puntos en el interior del laboratorio.

Todas las señales de tensión se conectaron a una plaqueta intermedia construida con ese fin, mediante sendos cables planos. Las señales se trasladan a una tarjeta de adquisición de datos PC-LAB 812, que convierte en una señal digital todas las señales de tensión que llegan a ella. Esta tarjeta consta de 16 canales analógicos de entrada, de los cuales cuatro se usaron para la señal de tensión proveniente de los transductores de presión que sensaban las variaciones de peso en las dos balanzas, cuatro para los sensores de temperatura que componen los psicrómetros y el resto se utilizó para los sensores de temperatura ubicados en las cámaras, el producto y el ambiente.

El control de la colección de datos se realizó a través de un programa realizado en QBASIC. El mismo, mediante un algoritmo convierte esa señal digital en un número proporcional a la tensión de entrada y lo almacena en un archivo de datos, que después será procesado para calcular las cantidades buscadas.

## EXPERIENCIA

El laboratorio de secado fue utilizado en el transcurso del dictado uno de los módulos de la Maestría en Energías Renovables, dictada por la Universidad Nacional de Salta, para obtener la curva de secado de un dado producto y determinar los parámetros físicos relacionados con el proceso.

La práctica de laboratorio permitió a los alumnos familiarizarse con balanzas, sensores de temperatura, psicrómetros y programas de adquisición de datos; fue necesaria la calibración cuidadosa de las dos balanzas y la verificación de que los sensores de bulbo seco y bulbo húmedo funcionaran correctamente, como así también los ventiladores de la cámara y de los psicrómetros. Además, se debió determinar la cantidad de producto necesario que colocaron en cada cámara, los controles a realizar durante la realización de la experiencia y las variables a medir manualmente tales como: caudal, radiación, y el peso seco de la muestra y las áreas; como así también la frecuencia de medición.

Una vez que se colectaron los datos en un archivo, el objetivo de esta práctica fue el de obtener del coeficiente de difusión de masa del producto. Se procedió a trabajar con una planilla de cálculo, en la que se tenían registrados datos de tiempo, peso, humedad absoluta y relativa, humedad de saturación y temperaturas correspondientes a la entrada, a producto y la salida de la cámara de secado.

La curva de secado  $X(t)$ , es decir la variación del contenido de humedad del producto en función del tiempo, expresada en base seca, como así mismo el polinomio de ajuste y su expresión encontrada se muestra en la figura 5. Con esta curva de secado es posible determinar la velocidad de secado derivando la expresión del polinomio correspondiente.

La variación de contenido de agua entre dos puntos de medida sucesivos dividido el tiempo transcurrido entre ambas medidas, también permite obtener la velocidad de secado correspondiente a dicho intervalo. Los puntos obtenidos de esta manera, comparados con la derivada del polinomio de ajuste se pueden apreciar en la figura 6, donde se ve que a pesar de la dispersión de puntos la curva obtenida por ajuste polinómico es adecuada al comportamiento.

A partir de las curvas de secado y velocidad de secado, y con el tratamiento teórico adecuado, es posible la determinación de todos los parámetros que intervienen en la ecuación de la cinética de secado.

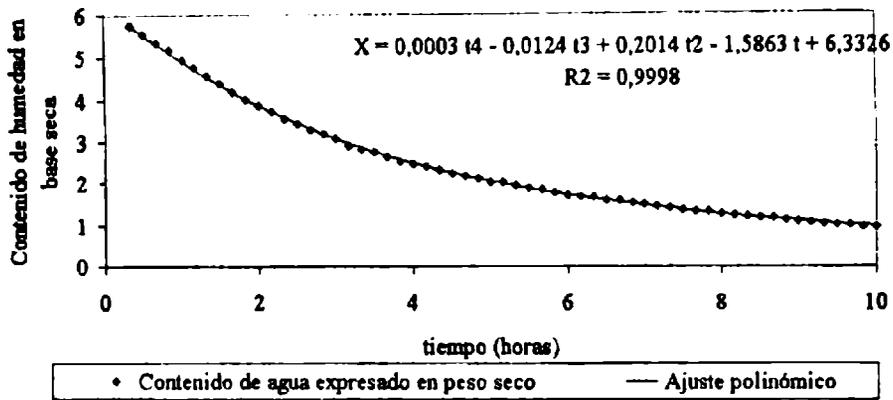


Figura 5. datos de peso y su polinomio de ajuste.

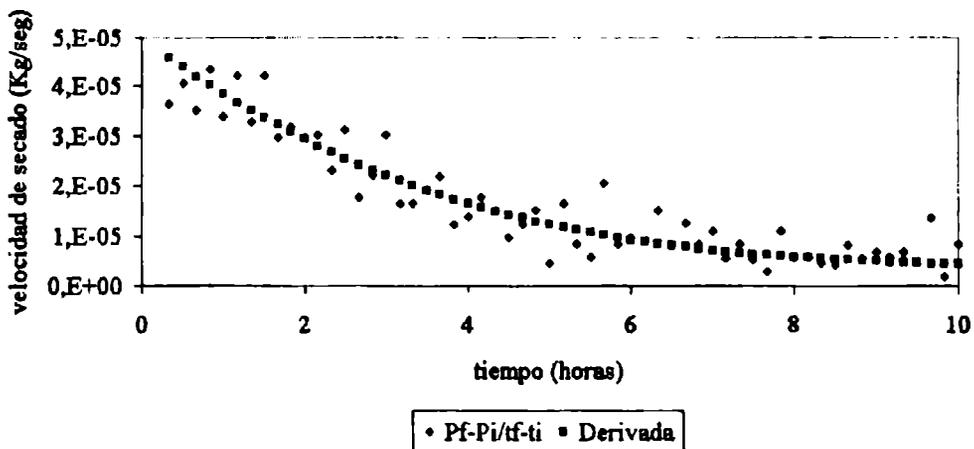


Figura 6. Velocidad de secado de distintos orígenes.

## CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un equipo de laboratorio sencillo a escala reducida para la realización de experiencias de secado. El mismo permite la realización de experiencias controladas en lo que se refiere a la radiación solar incidente, la temperatura de entrada en la cámara de secado y la humedad relativa ambiente.

El equipo ha demostrado su utilidad cuando se lo aplico con fines formativos y también para experiencias que requieren mayor precisión, tales como la validación de un modelo teórico de secador solar (Mealla Sánchez, 2000).

El equipo es económico, por lo que se espera que sea útil para otros interesados, su uso es relativamente sencillo, ha reproducido en este trabajo forma adecuada el comportamiento de la curva de secado de producto higroscópicos obtenidas en proceso de secado en escala real, y permitirá la realización de este tipo de experiencias aún en días nublados.

## REFERENCIAS

1. Mealla Sánchez L. (2000). Convalidación Experimental de la Teoría de Funcionamiento de los Secadores Invernadero de Doble Cámara. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Exactas. Universidad Nacional de Salta.
2. Condorí M. A. (1991). Optimización del diseño de Colectores Solares de Aire con Absorbedores de Piedra. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Exactas. Universidad Nacional de Salta.
3. Mealla Sánchez L. Y Saravia L. (1998) Balanza electrónica usando un transductor de presión. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol.2, Nº 2, pag. 05.5-05.7.
4. Mealla Sánchez L., Condorí M, Saravia L. Convalidación experimental del modelo invernadero-secador de doble cámara. Pruebas de laboratorio. Trabajo presentado simultáneamente a esta reunión.

## ABSTRACT

A drying laboratory built to perform experiences under controlled conditions is presented. As principal elements, this has a solar simulator built with a lamps array, a small scale drying chamber and a measures system controlled by computer. All of these elements were built with low cost materials. The different parts of the equipment are described and the measures obtained during the student practice are presented.