

## **Comportamiento térmico del secado de biomasa forestal en un lecho fluidizado agitado mecánicamente**

Rogelio Moreno, Gregorio Antolín <sup>(1)</sup>, Alejandro Reyes <sup>(2)</sup>

*Instituto de Materiales y Procesos Termomecánicos, Universidad Austral de Chile  
Casilla 567 Valdivia, Chile. rmoreno@uach.cl*

<sup>(1)</sup>*Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Valladolid  
47011 Valladolid, España*

<sup>(2)</sup>*Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Santiago de Chile  
Casilla 10233 Santiago, Chile*

### **RESUMEN**

En este trabajo se dan a conocer los resultados obtenidos en el análisis del comportamiento térmico de un secador de biomasa forestal en lecho fluidizado con agitación mecánica. El estudio se realiza en un equipo experimental tamaño piloto en operación batch. Mediante Técnicas de Taguchi se analiza el consumo específico de energía y las tasas de evaporación de agua y de producción de biomasa seca, en función de los factores de control (velocidad de agitación, temperatura de operación, velocidad superficial y carga de producto en el secador). Como factor de ruido se ha considerado a la humedad inicial de la biomasa. Los resultados del estudio revelan que el proceso de secado se logra con un consumo específico de 3040 kJ/kg de agua evaporada y un rendimiento térmico de 80%.

**Palabras claves:** Fluidización. Biomasa. Secado. Taguchi

## 1. INTRODUCCIÓN

El secado de partículas de biomasa forestal tiene hoy en día una gran importancia por el uso que se le da a esta materia prima en la fabricación de tableros de partículas, pellets, briquetas, como también para procesos de combustión y gasificación de biomasa [1,2].

Debido a los elevados consumos de energía que se requieren durante el proceso de secado de productos, una variable a optimizar es la eficiencia térmica, la cual, está estrechamente relacionada con el consumo específico de energía calórica del proceso [3].

En la actualidad el empleo de unidades de lecho fluidizado para el secado de partículas se ha visto incrementado debido a las múltiples ventajas que esta tecnología ofrece. Sin embargo, la biomasa forestal presenta el problema de alta aglomeración de los sólidos especialmente cuando ellos están con un alto contenido de humedad [4]. Por tal motivo, se han estudiado diversas alternativas para mejorar el proceso de fluidización, demostrándose que para partículas entre 1 y 4 mm el mejor sistema es un lecho fluidizado con agitación mecánica [5].

El análisis del consumo de energía calórica y de la tasa de evaporación de agua en el proceso de secado de biomasa forestal en un lecho fluidizado agitado mecánicamente, como también su optimización, son los objetivos de este trabajo. Adicionalmente, se analiza el comportamiento del secador en términos de la tasa de producción de biomasa en estado seco.

## 2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

El flujo de energía consumido en el proceso corresponde al calor sensible empleado en la unidad de calefacción, para elevar la temperatura del aire, desde la temperatura ambiental hasta la temperatura de operación. Así,

$$\dot{Q}_{gasto} = \dot{m}_g C_g (T_{g,e} - T_0) \quad (1)$$

Por otro lado, la eficiencia térmica puede ser relacionada con el consumo específico de energía  $q$ , el que se define como la razón entre el calor total gastado durante el proceso de secado y la masa de agua evaporada en el mismo período de tiempo, o sea:

$$q = \frac{\int_{t=0}^{t_s} \dot{m}_g C_g (T_{g,e} - T_0) dt}{(w_i - w_f) M_0} \quad (2)$$

Una vez que se ha calculado el consumo específico de energía, la eficiencia térmica global del proceso de secado  $\eta_{gl}$ , se puede definir, como la razón entre el consumo específico teórico, dado por el calor latente de vaporización del agua  $h_{fg}$  más el calor sensible para llevar previamente el agua al punto de saturación, y el consumo específico de energía real del proceso  $q$ :

$$\eta_{gl} = \frac{C_{H_2O}(T_{sat} - T_0) + h_{fg}}{q} 100 \quad (3)$$

Si el análisis se realiza en un período en que las partículas ya han alcanzado la temperatura a la cual se produce la evaporación de agua, la Ecuación (3) debe ser escrita como:

$$\eta_{gl} = \frac{h_{fg}}{q} 100 \quad (4)$$

Por otro lado, la tasa de evaporación de agua se define como la masa de agua evaporada, desde un cierto contenido de humedad inicial  $w_i$  hasta un contenido final  $w_f$ , en la unidad de tiempo y por unidad de área de secador. Se calcula como:

$$\dot{m}_{evap} = \frac{(w_i - w_f)M_0}{t_s A} \quad (5)$$

Por su parte, la tasa de producción de biomasa se define como la masa de producto anhidra, que el equipo es capaz de secar desde un cierto contenido de humedad inicial  $w_i$  hasta un contenido final  $w_f$ , en la unidad de tiempo y por unidad de área de secador. Se calcula como:

$$\dot{m}_{prod} = \frac{M_0}{t_s A} \quad (6)$$

### 3. MÉTODO EXPERIMENTAL

Empleando la metodología de Taguchi como herramienta de análisis del comportamiento del secador de biomasa, las variables a optimizar en la investigación son el consumo específico de energía calórica en la unidad de calefacción del aire fluidizante y la capacidad de secado, expresada como tasas de evaporación de agua y producción de biomasa seca.

Los factores que controlan un proceso de secado y que se han considerado en la optimización energética, son:

Factor A: velocidad de giro del agitador (r.p.s.).

Factor B: temperatura de operación (K).

Factor C: flujo másico del fluidizante (kg/s).

Factor D: carga de producto seco (kg).

Factor R: humedad inicial de la biomasa (kg/kg) considerado como factor de ruido.

La humedad inicial de los sólidos afecta al consumo de energía y probablemente también afecta la capacidad de evaporación de agua. Por lo tanto, al no ser un factor controlable, debe ser considerado como un factor de ruido.

El análisis regular ANOVA estudiará la influencia que ejercen los factores de control sobre el valor promedio de las variables a optimizar que son la eficiencia térmica y las capacidades de secado y producción. En los ensayos se ha considerado un tamaño representativo del tamaño medio de la biomasa, es decir,  $d_{p,m} = 1.85$  mm.

Se pretende evaluar los efectos principales y para ello la estrategia utilizada es un arreglo ortogonal (AO) interno para los factores de control y un AO externo para el factor de ruido.

Las características de calidad Señal/Ruido han sido evaluadas mediante las siguientes expresiones, válidas para respuestas esperadas del tipo mayor mejor y menor mejor, respectivamente [6]:

$$S / R = -10 \log \left[ \frac{1}{y_m^2} \left( 1 + 3 \frac{\sigma^2}{y_m^2} \right) \right] \quad (7)$$

$$S / R = -10 \log(y_m^2 + \sigma^2) \quad (8)$$

Los niveles escogidos para la fase de experimentación son los que se indican en la Tabla 1. Se opta por un AO  $L_8$  con 7 grados de libertad (Tabla 2), para incorporar una interacción doble, entre velocidad y temperatura de operación, pues se estima que puede ser importante en el consumo de energía y en la capacidad de extracción de humedad.

*Tabla 1 Factores y niveles del diseño experimental.*

Factor	Nivel 1	Nivel 2
A Velocidad de giro (r.p.s.)	1	2
B Temperatura de operación (K)	333	413
C Flujo másico ( $10^{-2}$ kg/s)	5.05	7.36
D Carga del producto b.s.(kg)	1.0	1.5
R Humedad de la biomasa (kg/kg)	0.8	1.5

El equipo experimental para los ensayos de consumo específico de energía y tasas de evaporación y producción, es el que se muestra en la Figura 1.

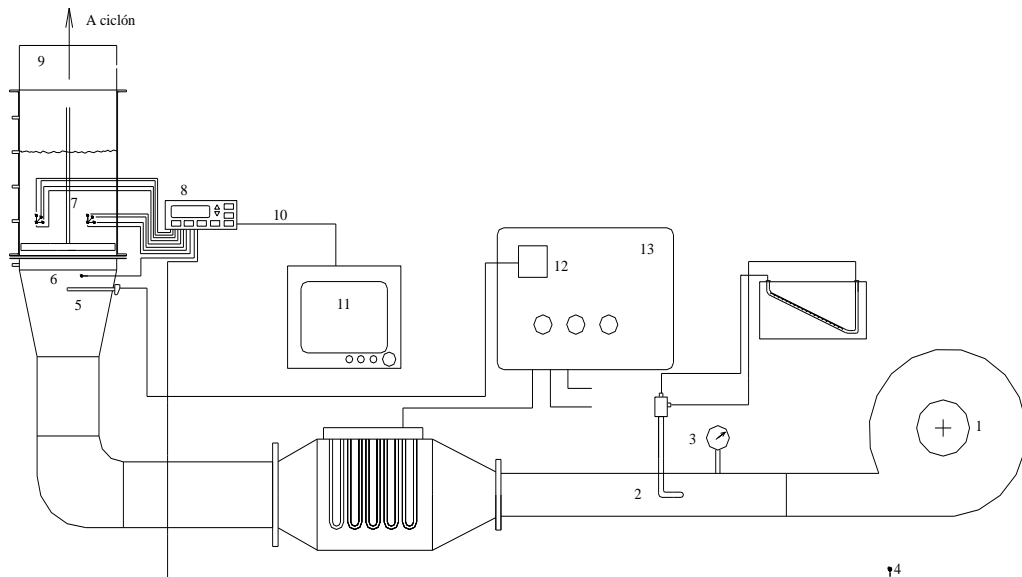
Para los cálculos del consumo de energía, la Ecuación (2) ha sido discretizada en el tiempo debido a que los registros de temperatura efectuados por el software *ScanLink 2.0*, durante los ensayos de secado no son continuos. El intervalo de tiempo que separa a dos datos consecutivos de temperatura adquiridos mediante el software, fue configurado en 4 segundos.

El tiempo de secado durante el cual se debe efectuar el análisis, debe ser obtenido de la curva de secado de cada ensayo, según sean los contenidos de humedad inicial y final de la

biomasa,  $w_j$  y  $w_i$ , respectivamente. El valor de  $M_0$  corresponde a la masa de biomasa cargada en el secador en estado anhidro.

*Tabla 2 Arreglo ortogonal  $L_8$  interno y externo para optimización del secado.*

Ensayo Nº	Factores de control, interacciones y error residual							Factor de ruido	
	A	B	$e_1$	C	D	BC	$e_2$	$R_1$	$R_2$
1	1	1	1	1	1	1	1	$y_1$	$y_{1r}$
2	1	1	1	2	2	2	2	$y_2$	$y_{2r}$
3	1	2	2	1	1	2	2	$y_3$	$y_{3r}$
4	1	2	2	2	2	1	1	$y_4$	$y_{4r}$
5	2	1	2	1	2	1	2	$y_5$	$y_{5r}$
6	2	1	2	2	1	2	1	$y_6$	$y_{6r}$
7	2	2	1	1	2	2	1	$y_7$	$y_{7r}$
8	2	2	1	2	1	1	2	$y_8$	$y_{8r}$



*Figura 1 Esquema del equipo experimental: (1) soplante; (2) tubo de Pitot; (3) manómetro de Bourdon; (4) termopar de temperatura ambiental; (5) sensor PT100; (6) termopar de temperatura de operación; (7) termopares de temperaturas en el lecho; (8) termómetro de barrido; (9) cámara de secado; (10) señal RS – 232; (11) ordenador; (12) controlador Fuzzy – Logic; (13) tablero de control*

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 ANOVA regular de los resultados

Los resultados obtenidos en cada uno de los experimentos de la matriz ortogonal  $L_8$  se han analizado mediante procesamiento estadístico ANOVA regular, con el fin de buscar la influencia de los factores de control en el valor promedio de las variables de calidad definidas. Los resultados para el consumo específico de energía se muestran en la Figura 2. Se puede apreciar que el factor que más influye sobre la variable de calidad es el flujo de aire tal como se

esperaba, lo cual confirma que, si bien, al operar el secador con velocidades bajas, se contribuye a aumentar los tiempos de secado, esto se ve fuerte y positivamente compensado por la disminución de la energía consumida en el período completo de secado debido a que se debe calentar flujos de aire más reducidos.

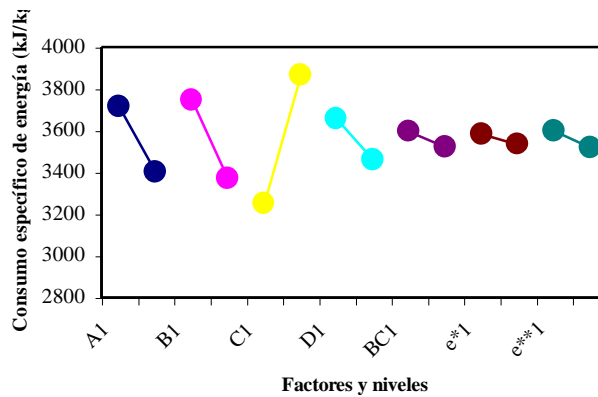


Figura 2 Gráfica factorial para el consumo específico de energía

Se observa también en la Figura 2 que al aumentar la temperatura de operación, el efecto negativo sobre el flujo de calor consumido, se ve claramente compensado por la disminución en los tiempos de secado. En cuanto al efecto de la velocidad de agitación y carga del producto, ambos factores, en sus niveles altos, favorecen la disminución del consumo de energía.

El efecto que cada factor ejerce sobre el consumo específico de energía se puede observar en la Tabla 3. El factor flujo de aire es el más relevante con un 56.3 % de la variación total; la temperatura de operación lo hace con un 21.1 % y la velocidad de agitación y carga del producto influyen en un 14.6 y 5.9 %, respectivamente. El error experimental en la evaluación del consumo específico de energía fue inferior al 1 %. La interacción entre los factores B y C queda confundida dentro del residual, obtenida en el ANOVA mediante el test de Fisher con estrategia de pooling up y un 90 % de confianza.

Según estos resultados, el rendimiento térmico, se ve fuertemente influido por la velocidad o flujo de gas. Efectivamente, esta variable mostró un comportamiento tal como el que se observa en la Figura 3. Además, según un ANOVA efectuado con 90 % de confianza, los resultados confirman que el factor más relevante en la optimización de la variable energética es el flujo de gas (54.1 %), seguida de la temperatura de operación (19.4 %), velocidad de agitación (15.5 %) y carga del producto (8.2 %). El residual, en este caso, fue inferior al 1 %.

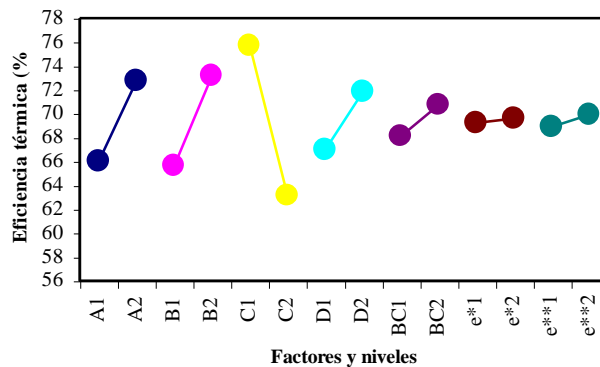


Figura 3 Gráfica factorial para el rendimiento térmico

Tabla 3 ANOVA del consumo específico de energía.

Factor	SS	GL	V	F	P(%)
A	195469	1	195469	20.5	14.6
B	282188	1	282188	29.5	21.1
e*	5025	1	5025		
C	753685	1	753685	78.9	56.3
D	79302	1	79302	8.3	5.9
BC	11590	1	11590		
e**	12051	1	12051		
e pooling up	28666	3	9555		2.1
TOTAL	1339310				100.0

Con relación a la tasa de evaporación de agua, según los resultados mostrados en la Figura 4, esta variable se ve principalmente favorecida con el empleo de altas temperaturas, con un porcentaje de influencia de 92.2 %, seguida por el flujo másico de fluidizante, aunque con un porcentaje muy bajo de influencia. Los otros factores y la interacción tienen una participación muy pequeña en el valor medio de la tasa de evaporación. La tendencia anterior es igual cuando se analiza la variable de salida tasa de producción.

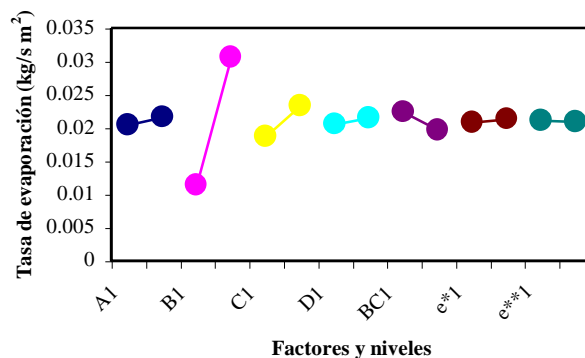


Figura 4 Gráfica factorial para la tasa de evaporación de agua

#### **4.2 Condiciones óptimas para el secado de biomasa**

Con base en los resultados obtenidos mediante las gráficas factoriales y ANOVA, los factores más influyentes en el desempeño del secador de biomasa forestal en lecho fluidizado con agitador mecánico, son el flujo de gas fluidizante y la temperatura de operación.

Desde el punto de vista de la temperatura de operación, puede afirmarse que todas las variables de calidad analizadas, se ven fuertemente favorecidas, cuando se emplean altas temperaturas, es decir, cuando la temperatura es fijada en su valor B<sub>2</sub>. Con relación a la velocidad de operación o flujo másico del fluidizante, si se desea privilegiar la disminución del tiempo de secado y por consecuencia, favorecer altas tasas de secado y de producción de biomasa seca, se debería elegir niveles altos de flujo másico de aire. Sin embargo, el porcentaje de influencia del flujo másico en estas variables de calidad es muy bajo, entre 3.3 y 5.4%, con relación al porcentaje de influencia que el flujo másico tiene sobre el consumo específico de energía y el rendimiento térmico del secador, que es del orden de 55 %. Por tal motivo, la variable flujo másico debe ser elegida en su nivel bajo.

La velocidad de giro se debiera fijar en su nivel alto, ya que es sobre el rendimiento térmico donde más efecto produce (15.5 % de influencia). Desde el punto de vista de las tasas de evaporación o producción, el efecto de la velocidad de agitación es despreciable y se confunde con el residual.

Al disminuir la carga de producto en el secador, se obtuvo un efecto del orden de 10.2 % en la variación total del tiempo de secado. Sin embargo, al aumentar la carga, se obtiene un efecto positivo sobre el consumo específico de energía y sobre el rendimiento térmico. Las otras variables no se ven afectadas por la carga de producto.

#### **4.3 Análisis Señal/Ruido**

En la Figura 5 se muestra el resultado obtenido con el análisis factorial de S/R para el rendimiento térmico del proceso de secado. Aunque los factores de control, especialmente, la temperatura y flujo de gas, tienen un importante efecto sobre el valor medio de las variables de consumo de energía y eficiencia térmica, tal como ya fue analizado en el apartado anterior, éstos factores no afectan significativamente a la variación de ellas. De todos modos, el proceso será más robusto si se eligen la combinación A<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C<sub>1</sub>D<sub>2</sub>, un resultado que muestra que los mismos niveles que favorecen el valor medio de las variables en el ANOVA regular, también favorecen una mayor S/R.

Por otro lado, desde el punto de vista de las tasas de evaporación y de producción, el factor significativo en la S/R es la temperatura de operación y debiera elegirse el nivel B<sub>1</sub>, para un proceso más robusto (Figura 6). Los otros factores son menos significativos.

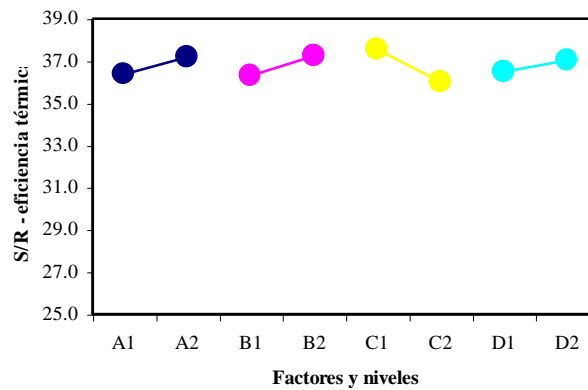


Figura 5 S/R para la eficiencia térmica del secador

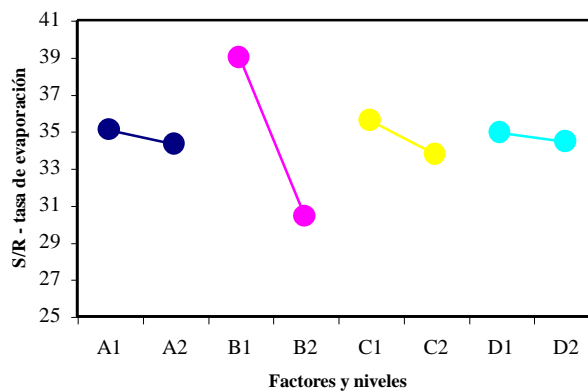


Figura 6 S/R para la tasa de evaporación

## 5. CONCLUSIONES

El proceso de secado se logra con un consumo específico de 2800 kJ/kg de agua evaporada y un rendimiento térmico de 85%. Cabe destacar que, como los cálculos de energía fueron efectuados en períodos donde la temperatura de la partícula ya había alcanzado el valor de temperatura de bulbo húmedo, al consumo de energía de 2800 kJ/kg debe adicionársele el consumo energético correspondiente al período inicial, desde que la biomasa es cargada en el secador hasta que las partículas adquieren la temperatura de bulbo húmedo correspondiente al período de tasa de secado constante. En este período, las partículas y el agua contenida en ellas sólo aumentan su temperatura, sin haber evaporación, o al menos ella es de un valor muy bajo, ya que se trata de un período de preparación del material para el secado. Al efectuar el cálculo de este consumo adicional de energía, el rendimiento térmico del secador desciende a 80 %, lo cual, equivale a un consumo específico de energía de 3040 kJ por cada kg de agua evaporada.

En cuanto al factor de ruido, al operar el secador con biomasa cargada con diferentes contenidos de humedad inicial, no se producen cambios importantes en los valores de rendimiento térmico ni en las tasas de evaporación de agua. La explicación de este comportamiento se atribuye a que el proceso de secado, según se ha podido observar en las curvas de secado, se lleva a cabo a una velocidad que, durante un gran porcentaje del tiempo total de secado, se mantiene constante.

Con relación a la velocidad de giro del agitador mecánico, que ha sido usado como promotor de una buena calidad de fluidización, los resultados revelan, que con 2 r.p.s. se han producido los mejores resultados, desde todos los puntos de vista. Se ha conseguido en ese nivel, acelerar el proceso de remoción de humedad del producto y, además, con un mejor rendimiento térmico.

Valores más elevados en la velocidad de giro, no son recomendables. Incluso, con bajos contenidos de humedad se pudo observar que la velocidad de giro puede ser disminuida a valores de 0.5 r.p.s.

## **6. REFERENCIAS**

- [1] A. A. Zabaniotou, Simulation of forestry biomass drying in a rotary dryer, *Drying Technology*, **18(7)**, 1415-1431, 2000.
- [2] M. Olazar, R. Aguado, J. Bilbao, A. Barahona, Pyrolysis of sawdust in a conical spouted-bed reactor with a HZSM-5 catalyst, *AIChE Journal*, **46(5)**, 1025-1033, 2000.
- [3] Y. F. Snezhkin, A. A. Khavin, Estimation of thermal efficiency of driers working with materials with various initial humidity, *Heat Transfer Research*, **28(4-6)**, 349-351, 1997.
- [4] R. Moreno, R. Ríos, Study on sawdust drying techniques in fluidized bed, *Biosystems Engineering*, **82(3)**, 321-329, 2002.
- [5] R. Moreno, G. Antolín, A. Reyes, Quality of fluidisation for the drying of forestry biomass particles in fluidised bed, *Biosystems Engineering*, accepted for publication (2006).
- [6] P. J. Ross, *Taguchi Techniques for quality engineering*, 2<sup>nd</sup> ed., Ed. Mc Graw-Hill, New York, 1996.

## **Agradecimientos**

Los autores agradecen el apoyo financiero de la Dirección de Investigación y Desarrollo de la Universidad Austral de Chile (Proyecto S-2002-07) y a la Universidad de Valladolid de España.