

GRADO DE SECADO Y EFICIENCIA TÉRMICA DE UN SECADOR DE TORNILLO TRANSPORTADOR DRYING

DEGREE AND THERMAL EFFICIENCY TO SCREW CONVEYOR DRYER

MANUEL ALEJANDRO TRIANA

Grupo de Investigación Química y Física de Celdas de Combustible, Universidad Del Valle, manuel triana v@hotmail.com

MARCOS ALEXANDER AYALA

Grupo de Investigación Química y Física de Celdas de Combustible, Universidad Del Valle, alexsaya@univalle.edu.co

FRANCISCO DE LA PUENTE

Grupo de Investigación Química y Física de Celdas de Combustible, Universidad Del Valle,

RUBEN CAMARGO-AMADO

Grupo de Investigación Química y Física de Celdas de Combustible, Universidad Del Valle

Recibido para revisar enero 20 de 2009, aceptado septiembre 8 de 2009, versión final octubre 21 de 2009

RESUMEN: En un secador tipo tornillo transportador (SCD), se evaluó el grado de secado y la eficiencia térmica en el secado de acetato de calcio dihidratado. El SCD tiene 8.66 m de longitud y 0.17 m de diámetro del tornillo. Las variables del diseño factorial (niveles mixtos 2×3^2) fueron: la velocidad rotacional del tornillo (N) en dos niveles, la temperatura (T) del sólido alimentado en tres niveles y el flujo de alimentación (C) en tres niveles. Durante los experimentos la humedad inicial del sólido estuvo entre 50-70%, obteniéndose grados de secado hasta del 14 % y eficiencias térmicas hasta del 88%. A partir de las superficies de respuesta de los anovas obtenidos en *StatGraphics 5.1*, se realizó la optimización simultánea de las dos variables de respuesta. Usando el concepto de diseño desbalanceado se encontró el óptimo global (45 °C, 8 L/min y 3 rpm), que coincide con el óptimo observado.

PALABRAS CLAVE: secador de tornillo transportador, ANOVA, diseño desbalanceado, optimización simultánea, StatGraphics 5.1 Plus.

ABSTRACT: This paper shows the drying degree and the thermal efficiency for the calcium acetate di-hydrate drying carried out in a screw conveyor dryer (SCD), of 8.66 m length and 0.17 m screw diameter. The experimental variables to factorial design (mixed design 2×3^2) were: the screw speed (N) in two levels, the temperature (T) of the solid feedstock to the screw in three levels, and the feeding flow (C) in three levels. In the experimental runs the solid's initial moisture was between 50-70%, and it was obtained a maximum drying degree of 14% and maximum thermal efficiency of 88%. The multivariate optimization of the two response variables was carried out starting from the regression models from the ANOVAS obtained in StatGraphics 5.1. For the incomplete design the global optimum point was in 45 °C, 8 L/min and 3 rpm, which coincides with the optimum experimental point.

KEYWORDS: Screw Conveyor Dryer (SCD), ANOVA, incomplete design, multivariate optimization, StatGraphics 5.1 Plus.

1. INTRODUCCION

Un secador de tornillo transportador (SCD) es un secador continuo de calentamiento indirecto, el cual consiste esencialmente en un transportador horizontal de tornillo confinado dentro de una

carcasa cilíndrica encamisada, Figura 1. El vapor desprendido se retira por boquillas en la carcasa. El SCD se recomienda para materiales de difícil manejo, es a menudo seleccionado antes que otros secadores con mecanismos de transporte. El SCD brinda un flujo uniforme además de una

operación ambientalmente limpia, permite recuperar solventes y evita la contaminación por polvos. La evaluación del secador se realizó para el proceso de producción de acetato de calcio (sólido cristalino).

Debido a la versatilidad que tiene este tipo de secador recientemente se han realizado estudios relacionados con el desempeño del secador y el comportamiento de las variables hidrodinámicas y térmicas. Ha sido estudiado el desempeño térmico de un SCD para el secado de sólidos cristalinos en una atmósfera inerte al vacío reportando valores del coeficiente global de transferencia de calor y eficiencia térmica en el rango de 46–102 W/m²K y 25–62% respectivamente [1]. Recientemente se ha estudiado la distribución del tiempo de residencia aplicable a un flujo no ideal asemejándolo a un reactor tipo PFR, encontrando un comportamiento para el sistema en estudio y determinando el flujo predominante entre flujo tapón y régimen de flujo mezclado [2] [3]. En el presente estudio se realizó un análisis experimental factorial y una optimización simultánea sobre superficies de respuesta para evaluar la eficiencia térmica y el grado de secado de un SCD desde un procedimiento estadístico adecuado y un análisis adimensional preliminar.

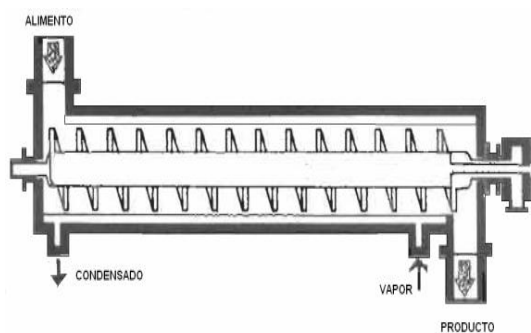


Figura 1. Tornillo transportador secador
Figure 1. Screw conveyor dryer

En el análisis experimental se usaron las dimensiones mostradas en la Tabla 1.

Tabla 1. Dimensiones del SCD empleado en el secado de acetato

Table 1. Geometrical parameters of the SCD, employed for the dried of acetate

PARAMETRO	LONGITUD (m)
Diámetro del tornillo	0.17
Longitud del tornillo	8.66
Diámetro del eje	0.06
Espaciamiento entre aletas	0.17
Diámetro carcasa Int. Ext. (con chaqueta)	0.20 0.25
Margen entre la aleta y el interior de la carcasa	0.015

2. DISEÑO EXPERIMENTAL

Previo al diseño factorial se realizó un análisis dimensional para seleccionar las variables a manipular en el secado y llegar a 3 números adimensionales, aplicando el teorema pi de Buckingham [4]:

$\left(\frac{\alpha_s}{\rho^2 N}\right)$ **Número de Fourier - Fo:** relaciona la razón de la rapidez de conducción de calor con la rapidez de almacenamiento de energía térmica en un sólido. Para este número se escogió la velocidad rotacional del tornillo N como variable del diseño.

$\left(\frac{\Delta H}{C_p T_{si}}\right)$ **Número delta - Δ :** relaciona el calor latente de vaporización del solvente con la entalpia del sólido húmedo. La variable experimental correspondiente fue la temperatura de entrada del sólido T_{si} .

$\left(\frac{C}{v_s L}\right)$ **Número de Reynolds - Re:** es la razón de las fuerzas de inercia y viscosas. La variable experimental seleccionada fue la carga del alimento C .

Se seleccionaron variables influyentes de mayor operatividad y menor costo de manipulación, definiendo sus respectivos niveles de operación. El arreglo de los factores y niveles establecidos dio un *diseño factorial 2x3²*, equivalente a 18 experimentos, Tabla 2.

Tabla 2. Diseño factorial 2x3² (18 experimentos)
Table 2. Factorial design 2x3² (18 runs)

		<i>Velocidad tornillo (rpm)</i>					
		3			7		
		<i>Carga (L/min)</i>			<i>Carga (L/min)</i>		
%GS		6	8	10	6	8	10
<i>Temperatura (±2 °C)</i>	45						
	53						
	61						

Criterios de análisis: Para predicción el coeficiente ajustado debe ser $R^2_{aj} \geq 70\%$ [5]. Una diferencia mayor del 20% entre R^2 y R^2_{aj} indica un problema con el modelo o con los datos [6].

3. BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA

El balance total de masa alrededor del sistema II de la Figura 2 produce:

$$S_{H1} - S_{H2} - S_{HR} - v_2 = 0 \tag{1}$$

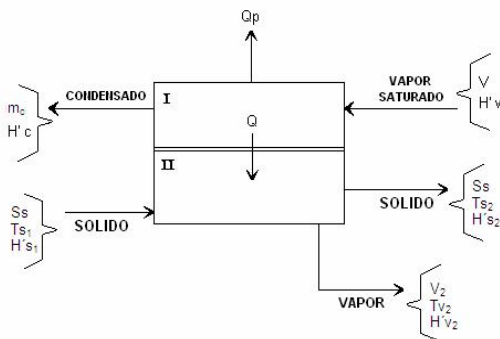


Figura 2. Balances de materia y energía
Figure 2. Balances of mass and energy

En términos de sólido seco y humedad en base seca, la humedad evaporada se calcula como:

$$v_2 = S_{S1}(1 + X_1) - S_{S2}(1 + X_2) - S_{HR} \tag{2}$$

El sólido húmedo retenido en el secador se calculó con la densidad del acetato de calcio (ρ : 1.2 Kg/L \approx cte.) y el volumen retenido V_R calculado con la ecuación [1]:

$$V_R = \alpha \frac{\pi}{4} ([D_{to}^2 + 2r]^2 - D_{ej}^2) (L - n.e) * 1000 \tag{3}$$

Para el caso en estudio se requiere el cálculo de la fracción de llenado del secador α .

$$\alpha_{flujo} = \frac{C}{\frac{\pi}{4} (D_{to}^2 - D_{ej}^2) (P - e) N * 1000} \tag{4}$$

Para la geometría del SCD la Figura 3 correlaciona llenado real α y el grado de llenado correspondiente al área de flujo α_{flujo} .

X_1 y X_2 se determinaron experimentalmente del alimento y la salida. X_2 corresponde a la humedad del sólido total recolectado S_{S2} .

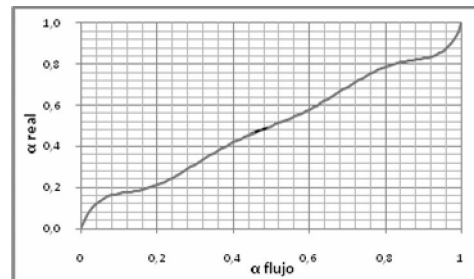


Figura 3. Grado de llenado del flujo vs. Grado de llenado real
Figure 3. Degree of fullness for the flow vs. real degree of fullness

Al remplazar en la Ecuación 2 la carga alimentada y el volumen de producto recolectado, el cálculo de la humedad evaporada es:

$$v_2 = \rho.(C.t - V_{H2} - V_R) \tag{5}$$

Las variables medidas fueron: ρ , C , V_{H2} y t , donde t es el tiempo de operación en minutos. De la ecuación 3 V_R se calculó en litros.

Las entalpías del sólido húmedo H'_s (base seca) en la entrada y la salida del SCD se calcularon con la ecuación:

$$H'_s = C_s(t_s - t_o) + XC_A(t_s - t_o) \quad (6)$$

El balance de energía alrededor del sistema II dio como resultado:

$$S_{s2}H'_{s1} + Q = S_{s2}H'_{s2} + v_2(H'_{v2} - H'_{l2})$$

En esta ecuación se elimina el calor sensible del sólido retenido (despreciable respecto al calor latente de la humedad evaporada), lo cual simplifica el cálculo. La diferencia entre la

entalpía del vapor y la entalpía de salida del solvente líquido $H'_{v2} - H'_{l2}$ es el calor latente de vaporización a la temperatura de salida del sólido, por tanto:

$$Q = S_{s2}H'_{s2} + v_2\Delta H'_{vap} - S_{s2}H'_{s1} \quad (7)$$

Los balances de materia y energía alrededor del sistema I producen respectivamente:

$$v = m_c \quad (8)$$

$$vH'_v = m_c H'_c + Q + Q_p$$

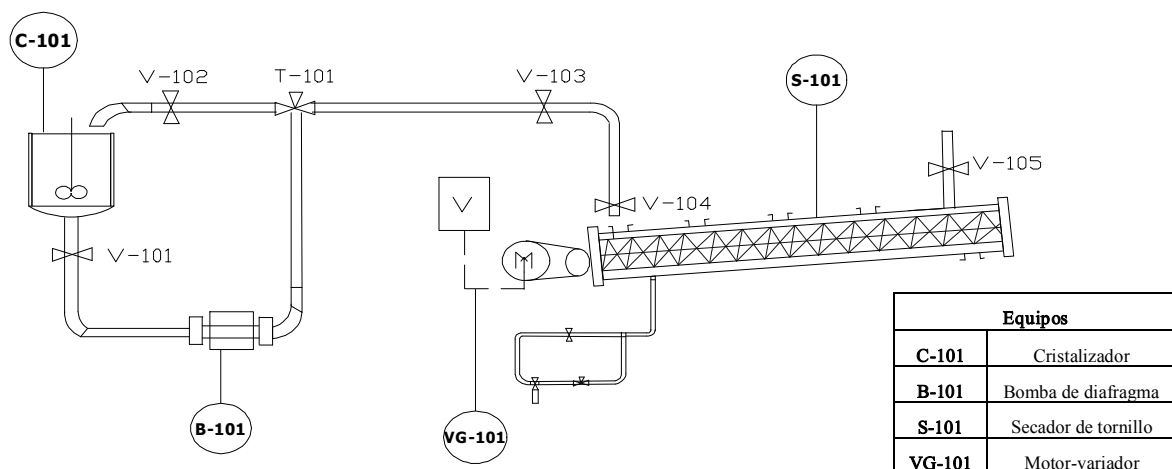


Figura 4. Montaje experimental

Figure 4. Experimental setup

Donde $(H'_v - H'_c)$ es el calor latente de condensación a la temperatura de saturación $\Delta H'_{cond}$.

$$m_c\Delta H'_{cond} = Q + Q_p \quad (9)$$

4. EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA TÉRMICA Y EL GRADO DE SECADO

La eficiencia térmica se calculó con respecto al calor total entregado por el vapor de la chaqueta:

$$\eta_T = \frac{Q}{Q + Q_p} * 100\%$$

Al sustituir las ecuaciones 7 y 9 en esta expresión, se obtuvo la ecuación para el cálculo de la eficiencia térmica:

$$\eta_T = \frac{S_{s2}(H'_{s2} - H'_{s1}) + v_2\Delta H'_{vap}}{m_c\Delta H'_{cond}} * 100\% \quad (10)$$

El grado de secado obtenido se calculó con base en la humedad del alimento:

$$GS = \frac{X_1 - X_2}{X_1} * 100\% \quad (11)$$

5. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

La experimentación se desarrolló en el sistema mostrado en la Figura 4. Consta de un cristizador con chaqueta C-101 donde se controla la humedad del alimento (50-70%) y su temperatura. El sistema de alimentación al tornillo tiene una bomba de doble diafragma B-101 (inyección de aire), una válvula de recirculación V-102 y las válvulas de bloqueo V-101 y V-103 de la línea de descarga. La presión de aire de suministro de la bomba fue de 40 psi. El flujo de alimentación se ajusta con la válvula mariposa V-104 para 6, 8 ó 10 L/min. El secador de tornillo se calienta, S-101, con vapor de caldera a través de la válvula V-105.

Se acciona el tornillo fijando la velocidad (rpm) por medio del variador de frecuencia VG-101. Una vez ajustado el flujo, se purga el condensado remanente de la chaqueta y luego se dispone el flujo de alimentación en la primera boquilla del secador. Cuando el grado de llenado no cambia con el tiempo se mide la velocidad del tornillo.

El tiempo se contabiliza a partir del ingreso del alimento. El flujo de condensado de la trampa de vapor se recolecta. El tiempo total de operación fue de 25 min por experimento, incluyendo el estado transitorio y el estado estable.

6. DESARROLLO DEL ANOVA

Después de evaluar las variables de respuesta (ver Tabla 3) se realizaron los ANOVAS, notando en el proceso de validación correspondiente una clara desviación de los experimentos 6 y 10. Para todos los análisis se usó el paquete estadístico StatGraphics 5.1. Para la validación de ANOVAS se consideró el cumplimiento de los supuestos del modelo: varianza constante, normalidad e independencia de los datos [5].

Tabla 3. Evaluación del grado de secado y la eficiencia térmica

Table 3. Evaluation of the drying degree and the thermal efficiency

Orden de experimentos	T (°C)	N (rpm)	C (L/min)	Grado de secado%	Eficiencia térmica%
6	45	3	6	0.25	5.0
2	45	3	8	12.08	85.1
7	45	3	10	7.23	88.5
8	53	3	6	5.80	60.2
9	53	3	8	0.59	29.4
5	53	3	10	1.17	8.70
1	61	3	6	14.13	71.2
4	61	3	8	5.94	39.4
3	61	3	10	7.49	42.5
14	45	7	6	2.09	44.0
16	45	7	8	3.84	53.8
15	45	7	10	1.39	45.7
10	53	7	6	3.61	47.7
12	53	7	8	0.22	9.80
13	53	7	10	1.31	28.6
18	61	7	6	5.75	30.5
17	61	7	8	5.35	51.9
11	61	7	10	9.58	85.0

El primer paso consistió en validar el supuesto de varianza constante mediante la observación de los gráficos residuales, donde debe observarse un sesgo definido arriba y abajo de la media igual a cero, y donde todos los residuos están próximos entre sí. Como se puede observar en la Figura 5, el experimento 6 se desvía tanto para el grado de secado como para la eficiencia térmica.

Gráfico residual de la Eficiencia térmica

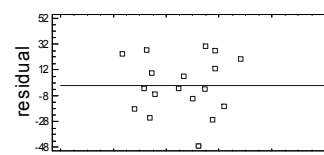


Gráfico residual del Grado de secado

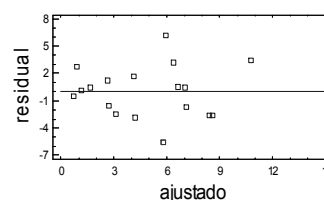


Figura 5. Gráficos residuales del diseño completo (n=18)

Figure 5. Residual charts from complete design (n=18)

Los coeficientes de determinación del ANOVA para el diseño completo se muestran en la Tabla 4. Los R^2 son pequeños cuando la variabilidad atribuible a los efectos es pequeña comparada con la variación observada en los datos experimentales. $R^2_{aj} = 0$ calculado para la eficiencia térmica, indica que ninguno de los efectos considerados en el ANOVA es significativo y por tanto la predicción de la variabilidad de los datos es nula.

La evaluación de los números adimensionales permite en algunas ocasiones determinar posibles causas de error, justificando desviaciones en el análisis estadístico. La desviación de un número adimensional se atribuye a una propiedad del sólido no controlada, para el experimento 6 la viscosidad alta del alimento $1.39 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, se vio reflejada en el número Reynolds. Sin embargo, en la práctica el grado de secado calculado será menor que el real si se toma la muestra del producto en un tiempo inferior al tiempo de operación establecido.

Tabla 4. Coeficientes de determinación
Table 4. Coefficients of determination

	$R^2\%$	$R^2_{Aj}\%$	$\Delta R\%$
ANOVA Ef. TERMICA	27.4009	0.00	27.4009
ANOVA G. DE SECADO	52.1064	9.5343	42.5721

Gráfico residual de la Eficiencia térmica

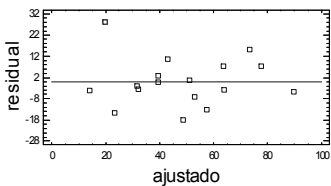


Gráfico residual del Grado de secado

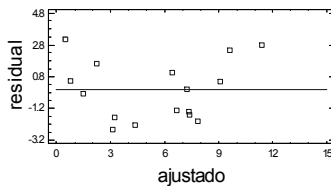


Figura 6. Gráficos residuales del diseño sin el experimento no.6 (n=17)
Figure 6. Residual charts from design without run no.6 (n=17)

Mediante observación de los gráficos residuales de la Figura 6 se encontró un nuevo punto fuera del sesgo (banda horizontal) donde se localizan la mayoría de los datos. Esta vez el punto rojo de las gráficas representa un exceso de las variables predichas para el experimento 10.

En este caso, la eficiencia térmica y el grado de secado tomaron valores razonables dentro de toda la población (47.7 y 3.61% respectivamente), sin embargo, sus valores exceden los valores de la vecindad.

La desviación reflejada en el número de Fourier se atribuye a la humedad del alimento, ya que 65 % es la mayor humedad en el bloque de 7 rpm donde pertenece el experimento 10. El grado de secado 3.61% puede ser indicio de una mayor tasa de secado una vez que el sólido entra a la humedad especificada.

Es importante anotar que el modelo ajustado cambia cada vez que el espacio muestral es modificado, por lo cual las desviaciones de los experimentos 6 y 10 no pudieron verse simultáneamente en el gráfico residual obtenido para el diseño completo.

En la Tabla 5, R^2 y R^2_{ajust} mejoran respecto del primer ANOVA.

Tabla 5. Coeficientes de determinación sin el experimento no.6

Table 5. Coefficients of determination without run no.6

	$R^2\%$	$R^2_{AJUSTADO}\%$	$\Delta R\%$
ANOVA Ef. TERMICA	77.4712	54.9425	22.5287
ANOVA G. DE SECADO	79.2999	58.5997	20.7002

7. ANOVA DEL DISEÑO DESBALANCEADO

En el caso de eliminación de datos se emplea el método exacto para la determinación de ANOVAS con celdas vacías. Existen cuatro métodos de la suma de cuadrados necesaria para determinar los efectos principales e interacciones, el usado fue el método tipo III. [7]. En las tablas 6 y 7 se muestran los ANOVAS resultantes del diseño.

El método exacto consistió en presentar el modelo de análisis de varianza como un modelo de regresión, ajustando el modelo a los datos y usando el enfoque general de significación de la regresión.

Todos los efectos fueron considerados en los modelos de regresión dado que cumplían con el primer criterio valor-P ≤ 0.5

Para corroborar la validez del modelo final (sin los experimentos 6 y 10), se aplicaron nuevamente los tres criterios: varianza constante, normalidad e independencia de los datos.

Tabla 6. Análisis de varianza desbalanceado para la Eficiencia térmica

Table 6. Variance analysis modified for the thermal efficiency

Efecto	Suma de cuadrados	GI	Media cuadrada	Razón - F	Valor - P
T: Temperatura	1168.91	1	1168.91	11.01	0.0128
C: Carga	103.548	1	103.548	0.98	0.3593
N: Vel tornillo	1955.66	1	1955.66	18.42	0.0036
TT	5413.09	1	5413.09	50.98	0.0002
TC	458.672	1	458.672	4.32	0.0763
TN	2177.78	1	2177.78	20.51	0.0027
CC	249.533	1	249.533	2.35	0.1692
CN	2680.61	1	2680.61	25.24	0.0015
Error total	743.336	7	106.191		
Total (corr.)	9276.91	15			
R-cuadrado %					91.9872
R-cuadrado (ajustado por g.l.) %					82.8298

Tabla 7. Análisis de varianza desbalanceado para el Grado de secado

Table 7. Variance analysis modified for the drying degree

Efecto	Suma de cuadrados	GI	Media cuadrada	Razón - F	Valor - P
T: Temperatura	2.57131	1	2.57131	0.48	0.5107
C: Carga	10.9304	1	10.9304	2.04	0.1962
N: Vel tornillo	78.4376	1	78.4376	14.65	0.0065
TT	124.477	1	124.477	23.24	0.0019
TC	3.51624	1	3.51624	0.66	0.4444
TN	28.8504	1	28.8504	5.39	0.0533
CC	4.59606	1	4.59606	0.86	0.3851
CN	39.762	1	39.762	7.42	0.0296
Error total	37.4892	7	5.3556		
Total (corr.)	260.289	15			
R-cuadrado %					85.597
R-cuadrado (ajustado por g.l.) %					69.1365

7.1 Varianza constante

Para comprobar que los tratamientos tienen la misma varianza, se graficaron los valores predichos por cada modelo contra los residuos (\hat{Y}_{ij} Vs e_{ij}), como se observa en la Figura 7.

Al verificar que los puntos se distribuyeron aleatoriamente en una banda horizontal (sin un patrón claro y contundente), se corrobora el supuesto de la varianza constante.

Gráfico residual de la Eficiencia térmica

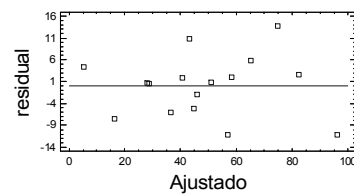


Gráfico residual del Grado de secado

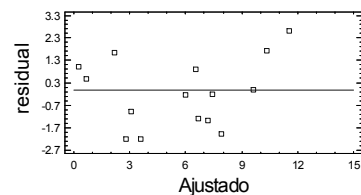
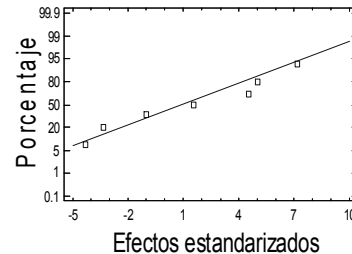


Figura 7. Gráficos residuales del diseño final (n=16)

7.2 Normalidad

Este criterio emplea la gráfica de probabilidad normal, Figura 8. Se corroboró que los residuos seguían una distribución normal, al observar que estaban claramente alineados sobre la línea de referencia. Los ejes están escalados de modo que la función de distribución es una línea recta.

Gráfico de probabilidad normal de la Eficiencia térmica



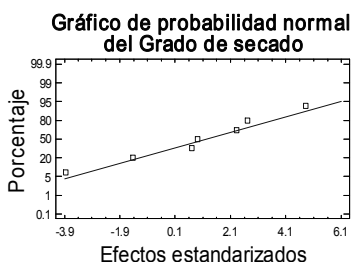


Figura 8. Gráficos de probabilidad normal del diseño final

Figure 8. Normal charts from final design

7.3 Independencia

El gráfico de independencia muestra en el eje horizontal el tiempo (orden de los experimentos igual al ingresado en StatGraphics) y en el eje vertical los residuos, Figura 9.

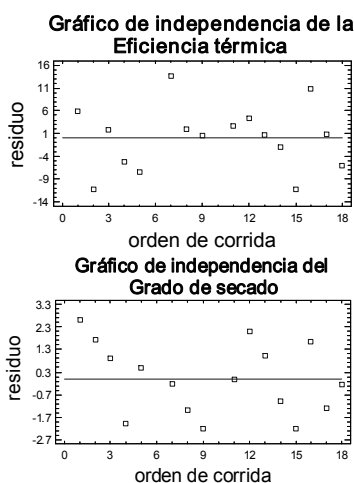


Figura 9. Gráficos de independencia del diseño final

Figure 9. Charts of independence of the final design

Al observar la distribución de los residuos no se detectó ninguna tendencia o patrón definido, indicativo de la no existencia de correlación entre los errores y por tanto el supuesto de independencia se cumple.

8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La interpretación grafica de los efectos permite hacer un diagnostico rápido y eficaz de la sensibilidad de la variable de respuesta. En la Figura 10 (Pareto), se presentan los efectos considerados en el análisis de varianza: 3 efectos principales, 3 interacciones y 2 efectos cuadráticos. El efecto neto estandarizado se

compara con el estadístico de prueba *t-student*, indicando así los efectos más significativos para cada variable de respuesta. En este caso el efecto estandarizado debe ser mayor o igual a 2.4, equivalente al criterio valor- $P \leq 0.05$

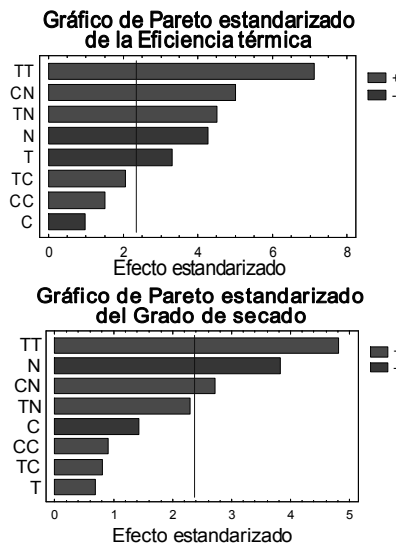


Figura 10. Gráficos de Pareto de las variables de respuesta

Figure 10. Pareto charts from the response variables

Por tanto, el análisis paralelo de las dos variables condujo a un grupo reducido de efectos significativos al tomar los efectos comunes que afectan en mayor grado a las dos respuestas del sistema:

$$n_T \cap GS: \{TT, N, CN, TN\}$$

La intersección de los conjuntos da como resultado un conjunto de 4 efectos importantes analizados individualmente:

Efecto TT: es más significativo que el efecto principal T, entonces las respuestas del sistema se ajustan mejor a un cambio de carácter cuadrático.

Efecto N: se compara con los otros dos efectos principales (C, T), trazando una línea recta entre el nivel inferior y superior sobre las curvas de la temperatura y la carga (Figura 11). La pendiente de mayor inclinación corresponde a la velocidad del tornillo en los casos de las variables de interés.

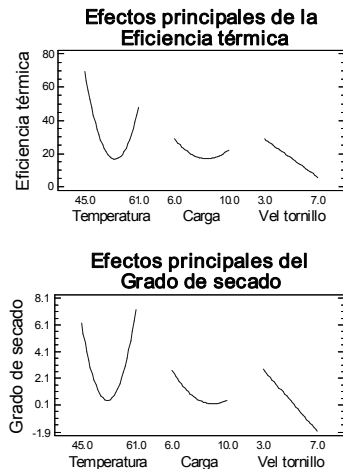


Figura 11. Efectos principales en las variables de respuesta

Figure 11. Main effects on output variables

Efecto CN: de la Figura 12 se infiere que el efecto de la carga es contrario en cada nivel de velocidad N . Ubicando CN en cualquiera de los gráficos se observa que C cambia sobre el eje x entre 6 y 10 L/min, mientras que las dos curvas representan los niveles alto (+) y bajo (-) de N . Para la curva del nivel alto $N(+)$, la carga debe aumentar en favor de la eficiencia térmica y el grado de secado; mientras que para la curva del nivel bajo $N(-)$, es necesario reducir la carga.

El fenómeno observado para la interacción CN responde a un grado de llenado pertinente en cada caso. En el nivel bajo de velocidad 3 rpm (-), se logra un mejor resultado al reducir la carga en el rango experimental, es decir, a la menor retención del sólido posible. Cuando el tornillo se opera a velocidad baja el mezclado es insuficiente y se favorece la transferencia de calor por conducción.

En el caso del nivel alto de 7 rpm (+), prevalece el fenómeno de transferencia de calor por convección y el mezclado. Adicionalmente, bajo esta condición es posible aumentar la carga y obtener una mayor área de transferencia de calor que favorezca la eficiencia térmica y el grado de secado.

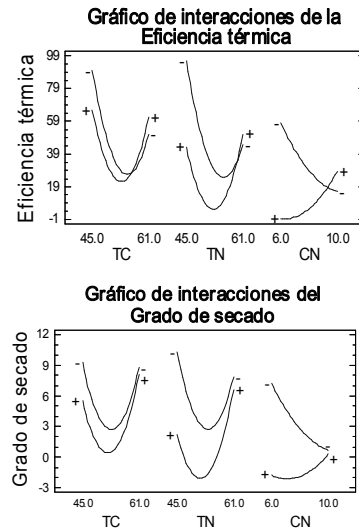


Figura 12. Efectos de las interacciones en las variables de respuesta

Figure 12. Effects of the interactions on output variables

Efecto TN: es similar a la del efecto CN . En el nivel bajo de velocidad del tornillo $N(-)$ es recomendable disminuir la temperatura del mejor punto. Por el contrario, en el nivel superior de la velocidad $N(+)$, se espera un mejor punto de operación al aumentar la temperatura.

Los dos puntos favorables son los extremos de la interacción ($TN = 45:3$ y $TN = 61:7$). La condición donde TN es 45:3 permite un tiempo de residencia y una diferencia de temperatura entre el sólido y el vapor de la chaqueta altos. Mientras en el extremo opuesto de la interacción, donde TN es 61:7, la tasa de transferencia de calor se compensa con un mayor coeficiente de transferencia (U), como resultado de un mejor mezclado y de la temperatura alta (cercana a la temperatura de equilibrio).

9. OPTIMIZACIÓN SIMULTANEA

Se obtuvo la superficie de respuesta correspondiente a cada variable de interés (ver Figura 13).

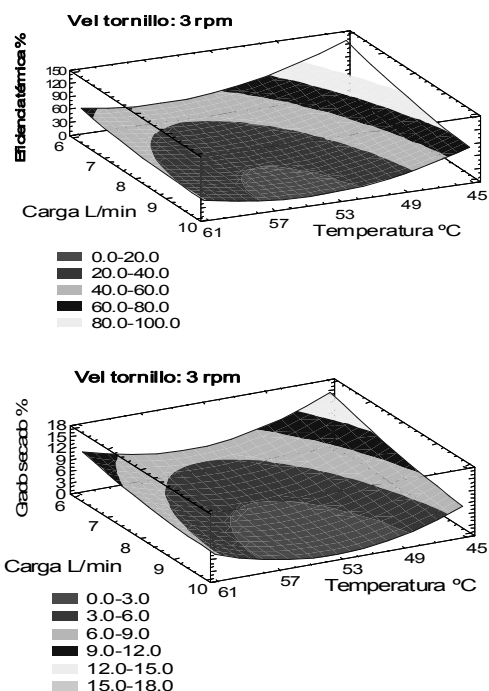


Figura 13. Superficies de respuesta de los análisis de varianza

Figure 13. Response surfaces of the variance analyses

Los modelos de regresión fueron respectivamente:

$$\eta_T = 2746.84 - 79.32T - 86.05C - 90.41N + 0.65T^2 + 0.55TC + 0.93TN + 2.08C^2 + 4.40CN \quad (12)$$

$$GS = 372.572 - 11.306T - 10.298C - 11.139N + 0.099T^2 + 0.048TC + 0.107TN + 0.283C^2 + 0.536CN \quad (13)$$

Donde las variables deben expresarse en sus unidades originales T: °C, C: L/min, N: rpm. Los óptimos individuales se encontraban sobre 3 rpm. El óptimo calculado dentro de los límites del diseño original corresponde al punto del experimento 6 (ver Tabla 3), mientras que el óptimo obtenido dentro de los límites del diseño desbalanceado tiene sus coordenadas en el experimento 2. Dichos óptimos se especifican en la Tabla 8. Como se observa, el modelo ajusta correctamente la respuesta dentro de los límites del diseño desbalanceado.

Por otro lado, en la extrapolación del vértice 45 °C, 6 L/min y 3 rpm, el modelo predice una eficiencia térmica del 134%. Aunque su

eficiencia está fuera de rango se resalta que este punto está próximo al máximo experimental.

Tabla 8. Óptimos de los modelos de regresión ajustados

Table 8. The adjusted regression models' optimum points

Rango de búsqueda: límites del diseño original			
Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Temperatura	45	61	45
Carga	6	10	6
Vel tornillo	3	7	3
Respuesta		Observada	Predicha
Eficiencia térmica		---	134
Grado de secado		---	16
Rango de búsqueda: límites del diseño desbalanceado			
Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Temperatura	45	61	45
Carga	6	10	8
Vel tornillo	3	7	3
Respuesta		Observada	Predicha
Eficiencia térmica		85.1	96.3
Grado de secado		12.08	11.18

10. CONCLUSIONES

El óptimo global predicho con el diseño desbalanceado coincidió con el óptimo global observado, 45 °C, 8 L/min, y 3 rpm. La ruta de optimización indicó una reducción en la carga hacia el óptimo extrapolado: 45 °C, 6 L/min y 3 rpm correspondiente a un vértice del diseño original. En el nivel inferior de carga a velocidad de 3 rpm predomina la transferencia de calor por conducción mientras a la velocidad 7 rpm, predomina la transferencia de calor por convección. Los grados de secado menores a 14% corroboran el uso del SCD como presecador en operación continua. La máxima eficiencia térmica fue del orden de 88%.

La causa del error en el experimento 6 es atribuible a menor duración del experimento, lo cual no permite la estabilización del sistema y afecta la medición de la humedad final del producto. La eliminación del experimento 10 se basó en una desviación local de la humedad del alimento (65%), observada por medio de una desviación en el número de Fourier.

Las variables seleccionadas a partir de los números adimensionales presentaron como efectos significativos el cuadrático TT , el

principal N , y las interacciones CN y TN . El tratamiento simultáneo del análisis de varianza y los números adimensionales, permitió detectar posibles fuentes de perturbación. Al emplearse únicamente el ANOVA del diseño factorial las causas de ruido podrían ser diversas dependiendo del criterio del investigador.

NOMENCLATURA

C	Carga de alimentación (L/min)
C_A	Capacidad calorífica de la humedad como un líquido, KJ/Kg °C
C_S	Capacidad calorífica del sólido seco, KJ/Kg °C
C_{PS}	Capacidad calorífica del sólido húmedo, KJ/Kg °C
D_{ej}	Diámetro del eje (m)
D_{to}	Diámetro del tornillo (m)
e	Espesor de aleta (m)
GS	Grado de secado (%)
H'_s	Entalpía del sólido húmedo en t_s , con respecto al sólido y líquido a la temperatura de referencia t_o , KJ/Kg sólido seco
H'_v	Entalpía del vapor de agua en t_v , con respecto a la temperatura de referencia t_o , KJ/Kg vapor de agua
L	Longitud del tornillo (m)
m_c	Flujo condensado (Kg/min)
N	Velocidad rotacional del tornillo (rpm)
n	Número de aletas (L/P)
p	<i>Pitch</i> del tornillo (m)
Q	Calor entregado por el medio de calentamiento al sólido seco, KJ/min
Q_P	Pérdida neta de calor (calor que no se aprovecha en el secado), KJ/min
r	Espacio radial entre el tornillo y la pared interna de la carcasa (m)
S_S	Flujo sólido seco (Kg/min)
S_H	Flujo sólido húmedo (Kg/min)
t_s	Temperatura del sólido húmedo (° C)
t_o	Temperatura de referencia (° C)
T_{Si}	Temperatura inicial del sólido (° C)
v	Flujo vapor de agua (Kg/min)
X	Masa agua/masa sólido seco
R²	Coefficiente de determinación.
R²_{aj}	Coefficiente de determinación ajustado al modelo.

Letras griegas

α	Grado de llenado
α_s	Difusividad térmica del sólido húmedo (m ² /s)
ΔH	Calor latente del solvente (KJ/Kg)
η_T	Eficiencia térmica (%)
ρ	Densidad aparente (Kg/m ³)
ν_s	Viscosidad cinemática del sólido (m ² /s)

Subíndices

R	Retenido
1	Entrada
2	Salida

REFERENCIAS

- [1] WAJE, THORAT, AND MUJUMDAR, "An Experimental Study of the Thermal Performance of a Screw Conveyor Dryer", Chemical Engineering Division, Institute of Chemical Technology, University of Mumbai India, 2006.
- [2] WAJE et al. "Study of residence time distribution in a pilot-scale screw conveyor dryer", *Drying Technology*, Vol. 24, No. 3, pp. 249-259. 2007
- [3] WAJE et al. "Hydrodynamic characteristics of a pilot-scale screw conveyor dryer", *Drying Technology*, Vol. 25, No. 4-6, pp. 609-616. 2007
- [4] ZLOKARNIK MARKO., "Scale-up in Chemical Engineering", Editorial WILEY-VCH. 2002 pp. 166-170.
- [5] GUTIÉRREZ P. H., SALAZAR R., "Análisis y Diseño de Experimentos", Editorial Mc Graw Hill, 100-114, 214-215, 2004.
- [6] MONTGOMERY D. C., "Diseño y Análisis de experimentos", Editorial Limusa Wiley, 194 – 206, 2002.
- [7] SANTANA C., LÓPEZ J. C., "Hipótesis y suma de cuadrados tipo III y IV un enfoque a través del modelo de medias de celda", *Revista colombiana de estadística*, Vol.24, N° 2, 91-110, 2001.