Eficiencia térmica y curva de secado de sal húmeda en un secador de bandejas de flujo paralelo

Fecha de recepción: 16 de septiembre 2026 Fecha de corrección: 15 de octubre 2026

José Alejandro García Ramos, Estefany Xiomara Lucero Morales, Marvin Ismael Queché Hernández, Edison Gonzalo Pérez Montepeque [1]

RESUMEN

En esta investigación se determinó la eficiencia térmica de un secador estático tipo bandejas con flujo de aire paralelo y se analizó su relación con la curva de secado de sal húmeda. El estudio se desarrolló a partir de datos experimentales obtenidos en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, durante el primer semestre de 2026.

La metodología consistió en evaluar cuatro corridas de secado con aperturas del dámper de 0, 2, 4 y 6 unidades. Durante el proceso se registraron el tiempo de secado, peso del sólido, velocidad del aire, temperaturas de bulbo seco y húmedo, y humedad relativa en la entrada y salida del equipo. Con estos datos se calcularon la humedad en base seca, humedad libre, velocidad de secado y eficiencia térmica de la máquina de secado.

Los resultados mostraron una disminución progresiva del peso y de la humedad del sólido con el tiempo. La eficiencia térmica presentó sus valores más altos al inicio del proceso, alcanzando aproximadamente 88 % para la apertura de 4 unidades. En general, la eficiencia disminuyó conforme avanzó el secado, debido a la menor disponibilidad de humedad libre en el sólido. Se concluye que la eficiencia térmica del secador está directamente relacionada con la etapa de mayor remoción de humedad; por lo que, en las curvas de secado, se interpreta el aprovechamiento energético del equipo.

Palabras clave: secador estático, bandejas, eficiencia térmica, curva de secado, humedad libre, velocidad de secado, transferencia de masa.

ABSTRACT

This research determined the thermal efficiency of a static tray dryer with parallel airflow and analyzed its relationship with the drying curve of wet salt. The study was based on experimental data obtained in the Unit Operations Laboratory of the School of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of San Carlos of Guatemala, during the first semester of 2026.

The methodology consisted of evaluating four drying runs with damper openings of 0, 2, 4, and 6 units. During the process, drying time, solid weight, air velocity, dry-bulb and wet-bulb temperatures, and relative humidity at the inlet and outlet of the equipment were recorded. With this data, moisture content on a dry basis, free moisture, drying rate, and thermal efficiency of the drying machine were calculated.

The results showed a progressive decrease in the weight and moisture content of the solid overtime. Thermal efficiency exhibited its highest value at the beginning of the process, reaching approximately 88% for the 4-unit opening. In general, efficiency decreased as drying progressed, due to the lower availability of free moisture in the solid. It is concluded that the thermal efficiency of the dryer is directly related to the stage of greatest moisture removal; therefore, the drying curves reflect the energy utilization of the equipment.

Keywords: Static dryer, trays, thermal efficiency, drying curve, free moisture, drying rate, mass transfer.

INTRODUCCIÓN

[1] *Estudiantes de último año de la Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala:; José Alejandro García Ramos, Email 3881123010101@ingenieria.usac.edu.gt; Estefany Xiomara Lucero Morales, Email: 3167122560505@ingenieria.usac.edu.gt; Marvin Ismael Queché Hernández, Email: 3600182890101@ingenieria.usac.edu.gt; y Edison Gonzalo Pérez Montepeque, Email: 2888893630608@ingenieria.usac.edu.gt.*

Eficiencia térmica y curva de secado de sal húmeda en un secador de bandejas de flujo paralelo

Fecha de recepción: 16 de septiembre 2026 Fecha de corrección: 15 de octubre 2026

El secado es una operación unitaria ampliamente utilizada en la industria química, alimentaria y agroindustrial, debido a que permite reducir el contenido de humedad de un material, mejorar su conservación y facilitar su almacenamiento. Durante este proceso ocurren simultáneamente fenómenos de transferencia de calor y masa, ya que el aire caliente suministra la energía necesaria para evaporar el agua contenida en el sólido, mientras que la corriente gaseosa arrastra el vapor generado (Salazar, 2018).

En los secadores convectivos tipo bandejas, variables como la temperatura, la humedad relativa, la velocidad del aire y la distribución del flujo dentro de la cámara influyen directamente en la rapidez del secado y en el aprovechamiento energético del equipo. Lobatón-García et al. (2023) señalan que los parámetros de diseño y operación de un secador de bandejas pueden afectar la conductividad térmica efectiva y la homogeneidad del proceso, por lo que la distribución del aire es un aspecto importante para lograr un secado más uniforme y eficiente.

En este contexto, la curva de secado permite analizar la disminución de humedad de la sal húmeda con respecto al tiempo, mientras que la eficiencia térmica permite estimar el grado de aprovechamiento de la energía suministrada durante la operación. Relacionar ambos aspectos permite interpretar de mejor manera el desempeño del secador, considerando no solo la velocidad de eliminación de humedad, sino también el uso de la energía térmica disponible.

El presente artículo tiene como objetivo calcular la eficiencia térmica de un secador tipo túnel de bandejas con flujo de aire paralelo y analizar su relación con la curva de secado obtenida experimentalmente. Para ello, se toman como base datos de una práctica de Operaciones Unitarias en la que se evaluó el secado de sal húmeda bajo diferentes aperturas del dámper. Este análisis es importante porque permite comprender el comportamiento del proceso y aportar criterios útiles para mejorar la operación de equipos de secado a escala de laboratorio e industrial.

MÉTODOS, PROCEDIMIENTOS Y MATERIALES

El estudio se desarrolló con un enfoque experimental cuantitativo, a partir de datos obtenidos en un secador estático tipo bandejas con flujo de aire paralelo. La investigación se orientó al análisis del comportamiento del secado de sal húmeda bajo diferentes condiciones de flujo de aire, modificadas mediante la apertura del dámper. Para ello se realizaron cuatro corridas experimentales correspondientes a aperturas de 0, 2, 4 y 6 unidades, manteniendo como material de estudio una muestra de sal colocada sobre la bandeja del secador.

La población de estudio estuvo constituida por el proceso de secado convectivo de sólidos en el equipo de laboratorio, mientras que la muestra experimental correspondió a las cuatro corridas realizadas con sal húmeda. La unidad experimental fue cada corrida de secado efectuada a una apertura determinada del dámper. Como variable independiente se consideró la apertura del dámper, debido a su influencia sobre el flujo de aire en la cámara de secado. Las variables dependientes fueron el peso del sólido, la humedad absoluta en base seca, la humedad libre, la velocidad de secado, y la eficiencia térmica estimada del equipo.

Para la ejecución de la práctica se empleó un secador estático tipo bandejas, una bandeja de secado, sal húmeda, balanza para el registro de masa, instrumentos para la medición de temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo, medidor de velocidad de aire y el sistema de regulación de flujo mediante dámper. Durante cada corrida se registró el tiempo de operación, la masa del sólido, la velocidad del aire y las condiciones psicrométricas de entrada y salida del secador. Las mediciones se realizaron a intervalos definidos durante el proceso, hasta

Fecha de recepción: 16 de septiembre 2026 Fecha de corrección: 15 de octubre 2026

observar una disminución significativa de la humedad del material.

El procedimiento experimental inició con la preparación y colocación de la muestra de sal húmeda sobre la bandeja del secador. Posteriormente se ajustó la apertura del dámper según la condición de operación correspondiente y se hizo circular aire caliente en flujo paralelo sobre la superficie del sólido. A lo largo del proceso se registró la variación de masa de la muestra, así como las temperaturas de bulbo seco y húmedo en la entrada y salida del equipo. Este procedimiento se repitió para cada apertura del dámper, con el fin de comparar el efecto del flujo gaseoso sobre la cinética de secado.

El procesamiento de datos se realizó mediante balances de materia aplicados al sólido húmedo. A partir de la masa inicial, masa final y masa de sólido seco se calculó la humedad absoluta en base seca. La humedad libre se obtuvo restando la humedad de equilibrio a la humedad en base seca correspondiente a cada tiempo de secado. Con estos valores se elaboraron las curvas de secado, representando la humedad en función del tiempo para cada apertura del dámper.

La velocidad de secado se determinó a partir de la variación de humedad en base seca con respecto al tiempo, considerando la masa de sólido seco y el área expuesta de la bandeja. Esta variable permitió identificar el comportamiento del proceso durante las etapas de mayor remoción de humedad. Asimismo, el flujo másico de aire se estimó mediante la densidad del aire, la velocidad promedio del flujo y el área transversal de paso. Con la velocidad de secado y las condiciones de humedad del aire se calculó el coeficiente global de transferencia de masa para cada apertura del dámper.

Para incorporar el análisis térmico, la eficiencia térmica del secador se estimó como la relación entre el calor útil empleado en la evaporación del agua removida y el calor suministrado al sistema. El calor útil se calculó a partir de la masa de agua evaporada y el calor latente de vaporización. La energía suministrada se evaluó con base en las condiciones del aire caliente utilizado durante el proceso de secado. De esta forma, la eficiencia térmica se relacionó con las curvas de secado mediante la comparación entre la humedad removida, la velocidad de secado y el aprovechamiento energético del equipo en cada condición de operación.

El análisis estadístico se realizó mediante modelos de regresión aplicados a las curvas experimentales. Para las curvas de peso y humedad en base seca se utilizaron ajustes lineales, mientras que la humedad libre y la velocidad de secado se ajustaron mediante modelos polinómicos según el comportamiento observado. La validez de los modelos se evaluó mediante el coeficiente de determinación, R^2, y mediante prueba F de Fisher-Snedecor con un nivel de significancia de 0.05. Los datos fueron tabulados y procesados en hojas de cálculo, lo que permitió comparar las condiciones de operación y establecer la relación entre flujo de aire, cinética de secado y eficiencia térmica estimada.

Las mediciones que se presentan a continuación corresponden a las variables registradas durante el proceso de secado de sal húmeda en un secador estático tipo bandejas. Se consideraron las dimensiones de la bandeja de secado y de la sección de entrada y salida del aire, así como el peso del sólido, peso del sólido seco, peso del sólido húmedo, tiempo de secado, temperaturas de bulbo seco y húmedo, humedad relativa en la entrada y salida del equipo, y velocidad del aire para diferentes aperturas del dámper.

Tabla 1

Medidas de la bandeja del túnel de secado

Largo (cm)	28.6
Ancho (cm)	24.9
Espesor (cm)	1.0

Fecha de recepción: 16 de septiembre 2026 Fecha de corrección: 15 de octubre 2026

Nota. Dimensiones de la bandeja empleada durante la práctica de secado. Elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

Largo (cm)	26.0
Ancho (cm)	13.8

Nota. Medidas de la abertura de aire del equipo de secado. Elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

Tabla 3

Peso del sólido húmedo y peso del sólido seco en la muestra

Peso del sólido, P_s (lb)	0.882
Peso del sólido seco, P_{ss} (lb)	0.331
Peso del sólido húmedo, P_{SH} (lb)	0.937

Nota. Determinación experimental del peso del sólido húmedo y seco de la muestra. Elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

Tabla 2

Dimensiones de la puerta de entrada y salida de aire del equipo de secado

Tabla 4

Propiedades psicrométricas del aire a la entrada y salida del túnel de secado de bandejas para una apertura de dámper de 0 unidades

Tiempo, t (min)	Peso del sólido Ps (lb)	Entrada			Salida		
		Temperatura de bulbo seco T_{bso} (°C)	Temperatura de bulbo húmedo T_{bho} (°C)	$\mathcal{H}_R$ (%)	Temperatura de bulbo seco T_{bsf} (°C)	Temperatura de bulbo húmedo T_{bhf} (°C)	$\mathcal{H}_R$ (%)
0.00	0.550	62.00	28.00	5.5	62.00	29.00	5.3
3.00	0.525	62.00	27.00	5.2	62.00	29.70	5.8
6.00	0.520	62.00	26.00	5.0	62.00	27.20	4.9
9.00	0.510	62.00	25.90	4.5	62.00	26.90	4.7
12.00	0.505	62.00	26.30	4.3	62.00	27.00	4.7
15.00	0.500	62.00	25.80	4.3	62.00	26.80	4.7
18.00	0.495	62.00	26.00	4.5	62.00	27.00	4.7
21.00	0.490	62.00	25.80	3.7	62.00	26.90	4.5
24.00	0.489	62.00	26.10	4.6	62.00	27.40	4.8
27.00	0.485	62.00	26.20	4.4	62.00	27.10	4.9
30.00	0.485	62.00	26.20	4.9	62.00	27.30	4.6

Nota. Datos experimentales del secado con dámper en 0 unidades, valores registrados durante la práctica. Elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

Tabla 5

Propiedades psicrométricas del aire a la entrada y salida del túnel de secado de bandejas para una apertura de dámper de 2 unidades

Fecha de recepción: 16 de septiembre 2026 Fecha de corrección: 15 de octubre 2026

Tiempo, t (min)	Peso del Solido Ps (lb)	Entrada			Salida		
		Temperatura de bulbo seco T_{bso} (°C)	Temperatura de bulbo húmedo T_{bho} (°C)	$\mathcal{H}_R$ (%)	Temperatura de bulbo seco T_{bsf} (°C)	Temperatura de bulbo húmedo T_{bhf} (°C)	$\mathcal{H}_R$ (%)
0.00	0.502	62.00	26.40	8.5	62.00	26.70	8.8
3.00	0.497	62.00	26.40	8.3	62.00	26.80	8.3
6.00	0.490	62.00	25.80	8.3	62.00	26.10	8.3
9.00	0.485	62.00	25.70	8.2	62.00	25.90	8.2
12.00	0.480	62.00	25.30	8.2	62.00	25.40	8.2
15.00	0.475	62.00	25.60	8.2	62.00	25.60	8.2
18.00	0.470	62.00	25.70	8.2	62.00	26.20	8.2
21.00	0.465	62.00	25.10	8.2	62.00	25.80	8.2
24.00	0.462	62.00	25.80	8.2	62.00	26.00	8.2
27.00	0.462	62.00	25.50	8.2	62.00	26.20	8.2
30.00	0.462	62.00	25.30	8.2	62.00	25.90	8.2

Nota. Datos experimentales del secado con dámper en 2 unidades, valores medidos durante la práctica. Elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

Tabla 6

Propiedades psicrométricas del aire a la entrada y salida del túnel de secado de bandejas para una apertura de dámper de 4 unidades

Tiempo, t (min)	Peso del Solido Ps (lb)	Entrada			Salida		
		Temperatura de bulbo seco T_{bso} (°C)	Temperatura de bulbo húmedo T_{bho} (°C)	$\mathcal{H}_R$ (%)	Temperatura de bulbo seco T_{bsf} (°C)	Temperatura de bulbo húmedo T_{bhf} (°C)	$\mathcal{H}_R$ (%)
0	0.455	62.00	26.30	5.10	62.00	26.60	5.50
3	0.450	62.00	25.70	4.50	62.00	26.40	5.30
6	0.435	62.00	25.50	4.30	62.00	26.00	4.80
9	0.430	62.00	25.50	4.20	62.00	26.00	4.70
12	0.425	62.00	25.50	4.20	62.00	25.90	4.60
15	0.423	62.00	25.50	4.20	62.00	25.90	4.60
18	0.420	62.00	25.50	4.20	62.00	25.90	4.60
21	0.420	62.00	25.50	4.20	62.00	25.90	4.60
24	0.420	62.00	25.50	4.20	62.00	25.90	4.60

Nota. Datos experimentales del secado con dámper en 4 unidades, valores tomados durante la práctica. Elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

Tabla 7

Propiedades psicrométricas del aire a la entrada y salida del túnel de secado de bandejas para una apertura de dámper de 6 unidades

Fecha de recepción: 16 de septiembre 2026 Fecha de corrección: 15 de octubre 2026

Tiempo, t (min)	Peso del Solido Ps (lb)	Entrada			Salida		
		Temperatura de bulbo seco T_{bso} (°C)	Temperatura de bulbo húmedo T_{bho} (°C)	$\mathcal{H}_R$ (%)	Temperatura de bulbo seco T_{bsf} (°C)	Temperatura de bulbo húmedo T_{bhf} (°C)	$\mathcal{H}_R$ (%)
0	0.380	62.00	27.60	6.80	62.00	27.60	6.80
3	0.370	62.00	25.80	5.00	62.00	26.40	5.20
6	0.365	62.00	25.70	4.40	62.00	26.00	4.70
9	0.353	62.00	25.50	4.30	62.00	25.80	4.60
12	0.350	62.00	25.30	4.00	62.00	25.80	4.50
15	0.345	62.00	25.20	3.90	62.00	25.80	4.50
18	0.340	62.00	25.20	3.80	62.00	25.80	4.50
21	0.335	62.00	25.20	3.80	62.00	25.80	4.50
24	0.335	62.00	25.10	3.70	62.00	25.80	4.50

Nota. Datos experimentales del secado con dámper en 6 unidades, valores registrados durante la práctica. Elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

Tabla 8

Velocidad del flujo de aire medida en seis posiciones a la entrada del túnel de secado de bandejas para una apertura de dámper de 0 unidades

Tiempo, t (min)	Velocidad en posición 1 (m/s)	Velocidad en posición 2 (m/s)	Velocidad en posición 3 (m/s)	Velocidad en posición 4 (m/s)	Velocidad en posición 5 (m/s)	Velocidad en posición 6 (m/s)
0.00	2.40	2.10	2.90	3.60	3.50	3.30
3.00	2.70	2.50	2.50	3.00	2.90	2.80
6.00	3.00	2.40	2.20	3.60	3.00	3.00
9.00	2.80	2.60	2.40	3.80	3.40	2.80
12.00	2.80	2.70	2.70	2.90	3.20	2.70
15.00	2.00	2.90	2.90	3.50	3.50	2.80
18.00	2.50	2.80	2.70	3.70	3.40	2.80
21.00	2.40	3.00	2.80	3.00	4.20	2.80
24.00	2.70	2.80	2.90	3.30	4.20	3.60
27.00	2.40	2.90	2.80	3.50	4.00	4.10
30.00	3.30	2.80	2.90	2.90	3.50	3.30

Nota. Velocidades de aire medidas en seis posiciones con dámper en 0 unidades, datos registrados durante la práctica de secado. Elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

Tabla 9

Velocidad del flujo de aire medida en seis posiciones a la entrada del túnel de secado de bandejas para una apertura de dámper de 2 unidades

Fecha de recepción: 16 de septiembre 2026 Fecha de corrección: 15 de octubre 2026

Tiempo, t (min)	Velocidad en posición 1 (m/s)	Velocidad en posición 2 (m/s)	Velocidad en posición 3 (m/s)	Velocidad en posición 4 (m/s)	Velocidad en posición 5 (m/s)	Velocidad en posición 6 (m/s)
0.00	0.90	1.20	1.90	2.10	2.22	2.40
3.00	1.00	1.50	1.20	2.10	2.90	3.70
6.00	1.10	2.30	2.50	2.20	3.00	3.30
9.00	2.50	2.40	2.20	3.10	3.50	3.20
12.00	2.00	2.30	2.30	2.80	3.70	3.90
15.00	2.50	2.10	2.20	3.10	3.60	3.10
18.00	3.00	2.80	2.60	3.30	3.40	3.10
21.00	2.50	2.40	2.10	3.50	3.10	3.00
24.00	1.60	2.50	2.50	3.70	3.00	2.80
27.00	3.00	2.60	2.40	3.10	3.10	2.50

Nota. Velocidades de aire medidas en seis posiciones con dámper en 2 unidades, valores tomados durante la práctica de secado. Elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

Tabla 10

Velocidad del flujo de aire medida en seis posiciones a la entrada del túnel de secado de bandejas para una apertura de dámper de 4 unidades

Tiempo, t (min)	Velocidad en posición 1 (m/s)	Velocidad en posición 2 (m/s)	Velocidad en posición 3 (m/s)	Velocidad en posición 4 (m/s)	Velocidad en posición 5 (m/s)	Velocidad en posición 6 (m/s)
0.00	3.30	3.70	3.70	3.80	4.00	4.50
3.00	3.10	3.30	3.30	3.40	3.80	3.20
6.00	2.80	3.30	3.50	3.30	3.70	4.70
9.00	3.30	3.30	3.20	4.30	3.90	3.60
12.00	3.10	3.20	3.50	4.10	5.00	4.30
15.00	3.40	3.40	3.30	4.40	4.00	4.80
18.00	3.10	3.10	3.20	3.60	4.10	4.80
21.00	3.00	2.90	3.00	5.40	5.50	5.00
24.00	2.10	3.30	3.40	4.20	4.60	4.30

Nota. Velocidades de aire medidas en seis posiciones con dámper en 4 unidades, datos registrados durante la práctica de secado. Elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

Tabla 11

Fecha de recepción: 16 de septiembre 2026 Fecha de corrección: 15 de octubre 2026

Velocidad del flujo de aire medida en seis posiciones a la entrada del túnel de secado de bandejas para una apertura de dámper de 6 unidades

Tiempo t (min)	Velocidad en posición 1 (m/s)	Velocidad en posición 2 (m/s)	Velocidad en posición 3 (m/s)	Velocidad en posición 4 (m/s)	Velocidad en posición 5 (m/s)	Velocidad en posición 6 (m/s)
0.00	3.00	3.20	3.70	3.50	4.60	4.70
3.00	3.00	2.90	3.10	3.20	3.50	3.10
6.00	2.10	3.30	3.60	4.10	5.80	5.40
9.00	3.00	2.20	3.30	4.30	3.80	4.00
12.00	10.70	11.80	12.20	22.10	18.00	18.70
15.00	8.30	10.90	10.20	18.10	20.30	18.80
18.00	2.10	3.50	2.10	6.30	6.20	6.50
21.00	2.60	2.40	2.70	5.60	4.70	5.50
24.00	3.60	2.80	3.60	3.30	5.00	4.70
27.00	2.90	3.70	3.90	4.00	3.50	4.30

Nota. Velocidades de aire medidas en seis posiciones con dámper en 6 unidades, valores obtenidos durante la experimentación. Elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

Una vez presentadas las variables monitoreadas, se procede al desarrollo de los cálculos correspondientes, en función de los objetivos planteados en este artículo.

METODOLOGÍA DE CÁLCULO

1. Cálculo del valor promedio

$$x_{prom} = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n} \quad (1)$$

$$v_{prom} = \frac{(2.40 + 2.10 + 2.90 + 3.60 + 3.50 + 3.30)\ \frac{m}{s}}{6}$$

$$v_{prom} = 2.9667\ \frac{m}{s}$$

$$v_{prom} = 2.97\ \frac{m}{s} \times \frac{3600\ s}{1\ h}$$

$$v_{prom} = 10680.12\ \frac{m}{h}$$

2. Área de la sección transversal de la bandeja de secado

$$A_{flujo} = l \times a \quad (2)$$

$$A_{flujo} = 0.2860\ m \times 0.2490\ m$$

$$A_{flujo} = 0.0712\ m^2$$

3. Densidad del aire

$$\rho_{aire} = 1 \times \frac{29}{0.0821 \times T_{amb}} \quad (3)$$

$$\rho_{aire} = 1 \times \frac{29}{0.0821 \times 298.15\ K}$$

$$\rho_{aire} = 1.1847\ \frac{kg}{m^3}$$

4. Flujo másico de aire

$$\dot{m} = \rho_{aire} \times v \times A_{flujo} \quad (4)$$

$$\dot{m} = 1.1847\ \frac{kg}{m^3} \times 10680.12\ \frac{m}{h} \times 0.0712\ m^2$$

$$\dot{m} = 901.0661\ \frac{kg}{h}$$

5. Humedad absoluta en base seca

$$X_{BS} = \frac{P_{SH} - P_{SS}}{P_{SS}} \quad (5)$$

$$X_{BS} = \frac{0.550\ lb_{H2O} - 0.331\ lb_{ss}}{0.331\ lb_{ss}}$$

$$X_{BS} = 0.6630\ \frac{lb_{H2O}}{lb_{ss}}$$

$$X_{BS} = 0.6630\ \frac{lb_{H2O}}{lb_{ss}} \times \frac{1\ kg_{H2O}}{2.2046\ lb_{H2O}} \times \frac{2.2046\ lb_{ss}}{1\ kg_{SS}}$$

Fecha de recepción: 16 de septiembre 2026 Fecha de corrección: 15 de octubre 2026

$$X_{BS} = 0.6630\ \frac{kg_{H2O}}{kg_{ss}}$$

6. Humedad de equilibrio del material sólido

$$X^{*} = 0.467\ \frac{kg_{H2O}}{kg_{ss}}$$

7. Humedad libre del material sólido

$$X^{libre} = X_{BS} - X^{*} \quad (6)$$

$$X^{libre} = (0.663\ - 0.467)\frac{kg_{H2O}}{kg_{ss}}$$

$$X^{libre} = 0.197\ \frac{kg_{H2O}}{kg_{ss}}$$

8. Velocidad de secado

$$R = -\frac{P_{SS}}{A_{flujo}} \times \frac{\Delta X_{BS}}{\Delta t} \quad (7)$$

$$R = -\frac{0.15\ kg_{SS}}{0.0712\ m^2} \times \frac{(0.588\text{-}0.663)\frac{kg_{H2O}}{kg_{ss}}}{(0.05 - 0)h}$$

$$R = 3.1847\ \frac{kg_{SS}}{m^2 \cdot h}$$

RESULTADOS

9. Calor total suministrado

$$\dot{Q}_{H2O} = \frac{(m_{H2O})C_{p,H2O}\left(T_{fp} - T_{ip}\right) + (m_{H2O})h_{fg}}{t} \quad (8)$$

$$\dot{Q}_{H2O} = \frac{(0.0023)(4.1885)(28.35 - 25) + (0.0023)(2428.4229)}{0.05}$$

$$\dot{Q}_{H2O} = 110.7878\frac{kJ}{h}$$

10. Calor disponible para el proceso de secado

$$\dot{Q}_d = \dot{m}C_{pa}\left(T_{fp} - T_{ip}\right) \quad (9)$$

$$\dot{Q}_d = (830.19575)(1.0005)(28.35 - 25)$$

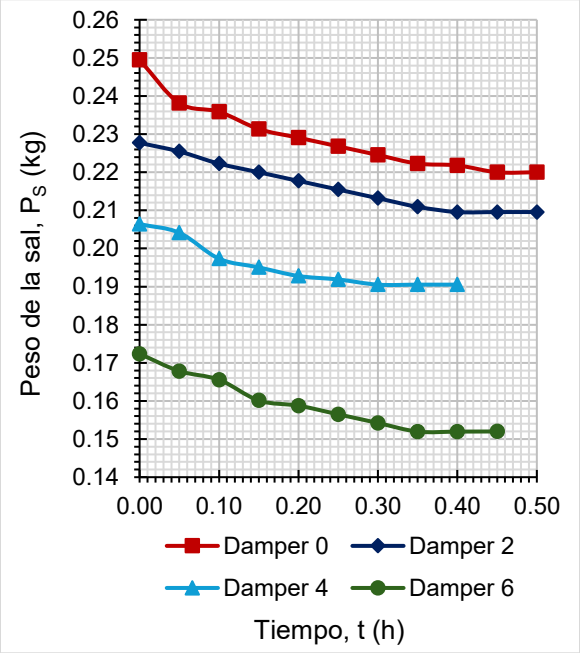
$$\dot{Q}_d = 30732.70646\ \frac{kJ}{h}$$

11. Eficiencia térmica de secado

$$\eta_{ts} = \frac{\dot{Q}_{H2O}}{\dot{Q}_d} \quad (10)$$

$$\eta_{ts} = \frac{110.7878}{30732.7065}$$

$$\eta_{ts} = 0.36$$



Nota. Los datos del diagrama provienen de las Tablas 4, 5, 6 y 7. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Figura 1

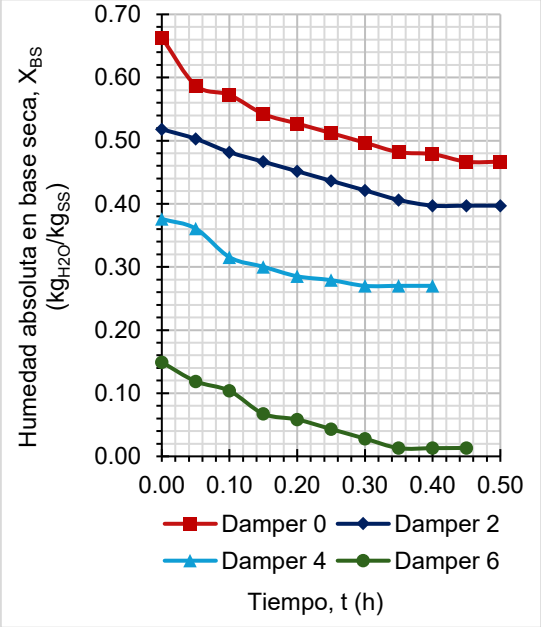
Peso de la sal en función del tiempo de secado para diferentes aperturas del dámper en el túnel de secado de bandejas

Figura 2

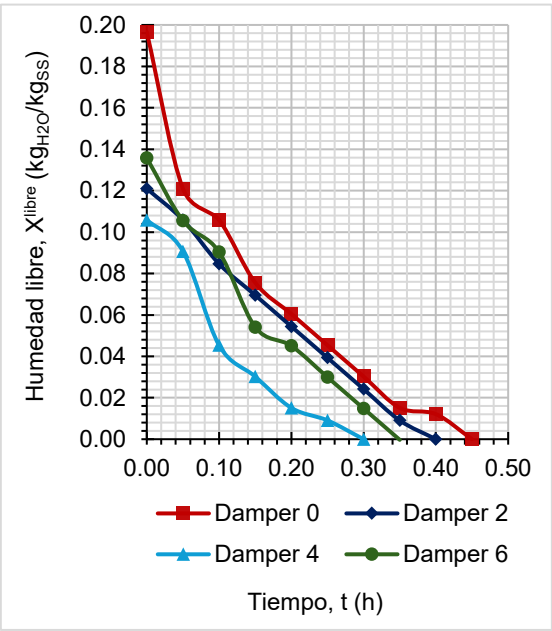
Humedad absoluta en base seca en función del tiempo de secado para diferentes

Fecha de recepción: 16 de septiembre 2026 Fecha de corrección: 15 de octubre 2026

aperturas del dámper en el túnel de secado de bandejas



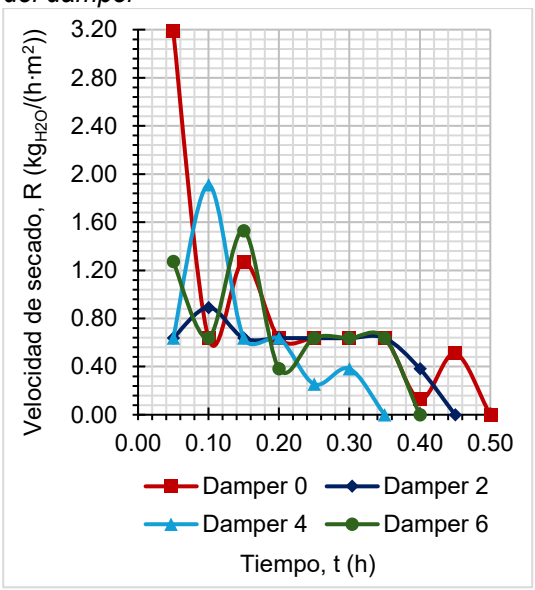
Nota. Los datos del diagrama se determinaron mediante la ecuación 5. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.



Nota. Los datos del diagrama se calcularon utilizando la ecuación 6. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Figura 4

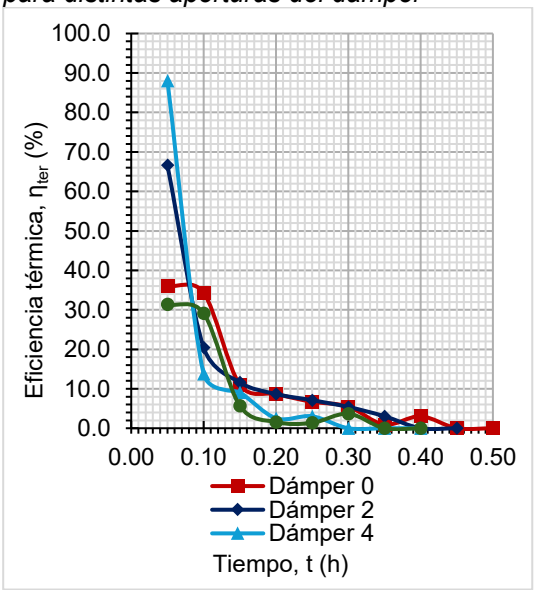
Velocidad de secado del sólido en función del tiempo de secado para diferentes aperturas del dámper



Nota. Los valores del diagrama se estimaron a partir de la ecuación 7. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Figura 5

Eficiencia térmica del secador estático tipo bandejas en función del tiempo de secado para distintas aperturas del dámper



Nota. Los datos del diagrama se determinaron empleando la ecuación 10. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Fecha de recepción: 16 de septiembre 2026 Fecha de corrección: 15 de octubre 2026

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El secado de sólidos elimina la humedad de un material mediante aire caliente, el cual evapora el agua y transporta el vapor generado. Este proceso presenta una etapa de velocidad constante y otra de velocidad decreciente, donde la humedad debe desplazarse desde el interior del sólido hacia la superficie antes de evaporarse (Geankoplis, 1998).

Durante la etapa de velocidad constante, la rapidez del secado depende principalmente de las condiciones externas del aire y no de la estructura interna del sólido (Treybal, 1980). Además, la apertura del dámper modifica el flujo de aire dentro del túnel y, por lo tanto, influye directamente en la rapidez del secado.

En el primer resultado se observa que la masa de la sal disminuye con el tiempo debido a la eliminación de humedad por convección forzada. A mayor apertura del dámper, el flujo de aire aumenta y la pérdida de masa ocurre más rápido, especialmente al inicio del secado. Hacia el final, la curva tiende a estabilizarse, lo que indica el paso al período de velocidad decreciente, donde la difusión interna controla la eliminación de la humedad restante (McCabe, Smith & Harriott, 2007).

En el resultado 2 y 3 se observa que tanto la humedad total como la humedad libre de la sal disminuyen con el tiempo para las diferentes aperturas del dámper. Las mayores aperturas permiten alcanzar contenidos de humedad más bajos en menor tiempo, debido a que el incremento del flujo de aire favorece la remoción del vapor formado en la superficie del sólido y mantiene elevada la fuerza impulsora de transferencia de masa (Bird, Stewart & Lightfoot, 2002). Además, la disminución rápida al inicio y más gradual al final evidencia la transición del período de velocidad constante al período de velocidad decreciente, hasta aproximarse a la humedad de equilibrio, donde la fuerza impulsora se reduce considerablemente (McCabe et al., 2007).

En el resultado 4 y 5 se analiza el comportamiento de la velocidad de secado bajo diferentes aperturas del dámper. En general, se observa que las mayores aperturas producen velocidades de secado más altas, debido al incremento del flujo de aire y al aumento del coeficiente de transferencia de masa, ya que este depende de la velocidad del gas (Bird et al., 2002). El comportamiento de las curvas permite identificar las etapas características del secado. Inicialmente, se presenta una zona de velocidad constante, asociada a la evaporación de la humedad superficial, seguida de una etapa de velocidad decreciente, donde la humedad debe difundirse desde el interior del sólido hacia la superficie. Esta transición puede relacionarse con la humedad crítica, que marca el cambio de pendiente en la curva de velocidad de secado respecto a la humedad total (Treybal, 1980).

La eficiencia térmica del secado disminuye conforme avanza el proceso, ya que al inicio existe mayor cantidad de humedad disponible y el calor se aprovecha mejor para evaporarla. La apertura del Damper influye en la eficiencia al modificar el flujo de aire caliente, afectando la eliminación de humedad y las pérdidas de calor dentro del secador (Dryer, 2025).

El análisis estadístico realizado mediante regresión lineal simple permitió evaluar la relación entre el tiempo de secado y las variables peso del sólido y humedad en base seca durante el período de velocidad constante. En todos los casos analizados, el estadístico F calculado fue mayor que el F crítico, por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta que existe una relación lineal estadísticamente significativa entre las variables. Esto indica que, durante el período de velocidad constante, tanto el peso del sólido como la humedad en base seca disminuyen linealmente con el tiempo.

Fecha de recepción: 16 de septiembre 2026 Fecha de corrección: 15 de octubre 2026

CONCLUSIONES

1. Se observa que la eficiencia térmica del secador presentó sus valores más altos al inicio del proceso de secado, específicamente alrededor de 0.05 h. El valor máximo se obtuvo con la apertura del dámper de 4 unidades, alcanzando aproximadamente 88 %, seguido por el dámper de 2 unidades con 67 %, el dámper de 0 unidades con 36 % y el dámper de 6 unidades con 31 %. Esto indica que el mayor aprovechamiento del calor suministrado ocurre durante la etapa inicial, cuando la humedad libre disponible en el sólido es mayor y la evaporación se desarrolla con mayor facilidad.

2. Las curvas de secado mostraron que la humedad libre tendió a valores cercanos a cero entre 0.30 y 0.45 h, dependiendo de la apertura del dámper. En ese mismo intervalo, la eficiencia térmica también se aproximó a 0%, evidenciando que el secador pierde energía en forma de calor cuando el sólido se acerca a su condición de equilibrio. Por lo tanto, el material deja de perder agua frente al ambiente que lo rodea, puesto que, el intercambio de humedad se detiene, porque la presión de vapor del material y la del aire circundante se han igualado.

3. La eficiencia térmica disminuyó conforme avanzó el tiempo de secado. Después de 0.20 h, la mayoría de corridas presentó eficiencias menores al 10%, lo cual coincide con la reducción de la pendiente en las curvas de humedad en base seca y humedad libre. Esto indica que, al disminuir la disponibilidad de agua en el sólido, lo cual indica que el calor fue suministrado de manera que se aprovechara en menor cantidad para que este pudiese evaporar la humedad.

4. Se determinó que para el equipo de secado utilizado el punto de mayor eficiencia térmica no coincide necesariamente con la mayor apertura del dámper, sino con la condición donde existe mejor equilibrio entre transferencia de calor y remoción de humedad. En este estudio, la apertura de 4 unidades presentó el valor inicial más alto de eficiencia, cercano al 88 %, mientras que la apertura de 6 unidades, a pesar de incrementar el flujo de aire, mostró una eficiencia inicial menor. Esto indica que el exceso de aire puede reducir el aprovechamiento térmico al transportar parte del calor fuera del equipo sin contribuir directamente a la evaporación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alvarado, J. (2013). *Principios de Ingeniería Aplicados en Alimentos* (2ª ed.): Diseño, Diagramación y Levantamiento de Texto: Paul Alvarado. Imprenta.

Baquero, J. (1985). *Equipos para la Industria Química y Alimentaria.* Alhambra.

Bird, R., Stewart, W., & Lightfoot, E. (2002). *Fenómenos de transporte* (2ª ed.). Reverté.

Çengel, Y., & Boles, M. (2015). *Thermodynamics: An engineering approach* (8th ed.). McGraw-Hill Education.

Çengel, Y., & Ghajar, A. (2011). *Transferencia de Calor y Masa - Fundamentos y Aplicaciones.* Mc Graw Hill.

Dryer, Z. (2025). *Secadores de bandejas tipo armario: ventajas para el procesamiento de alimentos*. Filter-Dryer.Com. https://www.filter-dryer.com/es/a-news-cabinet-tray-dryers-advantages-for-food-processing.html

Fecha de recepción: 16 de septiembre 2026 Fecha de corrección: 15 de octubre 2026

Geankoplis, C. (2003). *Transport Processes and Separation Process Principles* (4ª ed.). PHI Learning.

Gonçalves, E. (2024). *Dynamox.* Blog Dynamox. https://dynamox.net/es/blog/secadores-industriales-tipos-fallas-y-como-monitorearlos

Lobatón-García, H López-Mejía, N., & Cruz-Guayacundo, W. (2023). *CFD-response surface methodology to optimize the effective thermal conductivity and homogeneity in tray dryer. Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, 26*(2), e2241. https://doi.org/10.31910/rudca.v26.n2.2023.2241

McCabe, W., Smith, J., & Harriott, P. (2007). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química* (7ª ed.). China: Mc Graw Hill.

Navidi, W. (2006). *Estadística para ingenieros*. McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A. de C.V.

Perry, R. H., & Green, D. W. (Eds.). (2008). *Perry's chemical engineers' handbook* (8th ed.). McGraw-Hill.

Treybal, R. (1980). Operaciones de transferencia de masa (2ª ed.). McGraw-Hill.

Salazar, A. (2018). *Desarrollo de un sistema de secado de productos agrícolas con recuperación de calor de los gases de escape de un electrogenerador diésel usando intercambiadores de calor con cambio de fase* [Tesis de maestría, Instituto Tecnológico Metropolitano]. Repositorio ITM. https://repositorio.itm.edu.co/server/api/core/bitstreams/db6dbbe0-7e3f-409f-b341-48304eb65480/content