

## Simulación de la transferencia de calor en el contenedor de alimentación del secador por aspersión y su control de temperatura

### Simulation of heat transfer in the spray dryer feed container and its temperature control

E. Díaz-Montes <sup>a</sup>, E. A. Vargas-León <sup>a</sup>, A. Garrido-Hernández <sup>a</sup>, G. I. Cerón-Montes <sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>División Químico Biológicas, Universidad Tecnológica de Tecámac, Carretera Federal México - Pachuca, Km. 37.5, Predio Sierra Hermosa, C.P. 55740, Tecámac, Estado de México, México.

#### Resumen

Los componentes bioactivos de fuentes vegetales suelen ser inestables frente a factores como la radiación y los cambios de temperatura, lo cual implica que su conservación y manejo sea un reto. Un método para estabilizar este tipo de componentes es el secado por aspersión, que consiste en asperjar una dispersión líquida en la cámara de secado que circula aire caliente, para eliminar el agua y obtener un polvo. El primer punto de control es durante la etapa de alimentación, específicamente en la dispersión líquida, ya que debe mantenerse en un intervalo de temperaturas o de lo contrario podría generar una modificación no favorable en los componentes bioactivos termolábiles. Por lo anterior, el objetivo del trabajo fue predecir a partir de cálculos numéricos la transferencia de calor en el contenedor de alimentación del sistema de secado por aspersión, la afectación del tiempo finito de evaluación, y los coeficientes convectivos y conductivos de transferencia de calor sobre el historial térmico, además de los requerimientos de suministro de energía para mantener la temperatura controlada.

#### Palabras Clave:

Secado por aspersión, Simulación, Transferencia de calor, Segunda ley de Newton, Conducción, Convección.

#### Abstract

Bioactive components from plant sources are often unstable against factors such as radiation and temperature changes, which implies that their conservation and management is a challenge. One method to stabilize these types of components is spray drying, which consists of sprinkling a liquid dispersion in a distributed manner in the drying chamber that circulates hot air, to eliminate the water and obtain a powder. The first control point is during the feed stage, specifically in liquid dispersion, since it must be kept in a temperature range or otherwise it could generate an unfavorable modification in the thermolabile bioactive components. Therefore, the objective of the work was to predict from numerical calculations of the heat transfer in the feeding container of the drying system, the effect of the finite evaluation time, and the convective and conductive heat transfer coefficients on the thermal history, in addition of power supply requirements to maintain controlled temperature.

#### Keywords:

Spray drying, Simulation, Heat transfer, Newton's second law, Conduction, Convection

#### 1. Introducción

Los compuestos bioactivos como polifenoles, carotenoides, fitoesteroles y vitaminas (Hamzalioglu & Gökmen, 2016), son sustancias con actividad biológica, que impacta en el metabolismo y la salud de quien los consume (Angiolillo, Del Nobile, & Conte, 2015). Los métodos y técnicas para extraer estos componentes incluyen tratamientos mecánicos (p. Ej. prensado y tamizado), térmicos (p. Ej. pasteurización) y no térmicos (p. Ej. irradiación y pulsos eléctricos) (Al-Juhaimi et al., 2018). Mientras que, las tecnologías de conservación emplean métodos térmicos como la

refrigeración, congelación y secado en estufa (Papalia, Sidari, & Panuccio, 2019). Las cuales pueden afectar negativamente a los componentes bioactivos, ya que su estructura química conformada por dobles enlaces, le confieren inestabilidad y alta susceptibilidad a la oxidación (Sridhar, Inbaraj, & Chen, 2021). Por otro lado, existen otras tecnologías como el secado por aspersión, que tiene mayores ventajas en la conservación de los componentes bioactivos.

El secado por aspersión es una operación unitaria que convierte dispersiones líquidas a productos sólidos, con la finalidad de conservar, manipular, almacenar y transportarlos de manera más

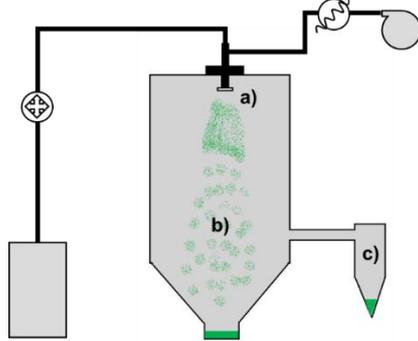
\*Autor para la correspondencia: [ivan\\_gcm@hotmail.com](mailto:ivan_gcm@hotmail.com)

Correo electrónico: [elsadimo123@gmail.com](mailto:elsadimo123@gmail.com) (Elsa Díaz-Montes); [enain\\_32@hotmail.com](mailto:enain_32@hotmail.com) (Enaim Aída Vargas-León); [ari\\_teogh@hotmail.com](mailto:ari_teogh@hotmail.com) (Aristeo Garrido-Hernández); [ivan\\_gcm@hotmail.com](mailto:ivan_gcm@hotmail.com) (Genaro Iván Cerón-Montes)

sencilla (Fang & Bhandari, 2017). Si la dispersión se mezcla con un agente encapsulante (material pared), se formarán

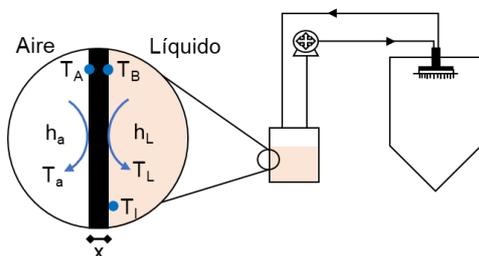
encapsulados que contendrán al compuesto bioactivo embebido en su interior (Rivas, Cabral, & Rocha-Leão, 2020). Típicamente, los materiales pared son carbohidratos de alto peso molecular, como almidón, maltodextrina y goma arábica, cuya finalidad es aumentar la temperatura de transición vítrea de la dispersión y reducir la adherencia a la pared del equipo durante el secado (Tran & V.H. Nguyen, 2018).

El proceso de secado por aspersión se divide en tres etapas, *a*) atomización, *b*) secado de sólidos y *c*) recolección de sólidos (Santos et al., 2017), como se aprecia en la Figura 1.



**Figura 1. Etapas del secado en un secador por aspersión: a) atomización, b) secado de sólidos y c) recolección de sólidos.**

Previo a la etapa de atomización, la dispersión circula del contenedor de alimentación hacia la entrada (filtro) del aspersor, en donde se asperja únicamente la proporción que el filtro permita fluir, de manera que, el resto de la dispersión regresa al contenedor de alimentación (Figura 2). Esta recirculación provoca una variación de temperatura de la dispersión, que si no se controla durante el tiempo de proceso podría repercutir en la estabilidad de los componentes bioactivos termolábiles. Por esto, el presente trabajo describe la simulación de la transferencia de calor que ocurre previo a la etapa de atomización, durante un proceso de secado por aspersión, es decir, en el contenedor de alimentación, con la finalidad de predecir el historial térmico ante variaciones del tiempo finito de evaluación, y los coeficientes convectivos y conductivos de transferencia de calor, con la finalidad de proponer un control en la temperatura.



**Figura 2. Diagrama de la transferencia de calor durante el flujo de alimentación del secado por aspersión.**

## 2. Procedimiento

### 2.1. Cálculo de la conducción

La conducción en la pared del contenedor se calculó mediante el flujo de calor ( $Q$ , kJ) que responde la Ley de Fourier (Finlay, 2019), de acuerdo con las Ecuaciones 1 y 2. Donde  $T_A$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) y  $T_B$

( $^{\circ}\text{C}$ ) son las temperaturas de la superficie del material por fuera y por dentro, respectivamente,  $k$  ( $\text{W/m } ^{\circ}\text{C}$ ) es la conductividad

térmica del material, y  $A$  ( $\text{m}^2$ ) es el área de la sección del contenedor en contacto con el líquido:

$$\Delta T = T_A - T_B \quad (1)$$

$$Q = A k (\Delta T / \Delta x) \quad (2)$$

### 2.2. Cálculo de la convección

La convección en la pared del contenedor y sus alrededores (líquido y ambiente) se calculó mediante el flujo de calor ( $Q$ , kJ) que responde la Ley de Newton (Ortega and Juan Rosales, 2018), de acuerdo con las Ecuaciones 3, 4 y 5. Donde  $T_a$  ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_1$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) y  $T_L$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) son las temperaturas del ambiente, el núcleo del líquido y del líquido en contacto con el contenedor, respectivamente;  $A$  ( $\text{m}^2$ ) es el área de la sección del contenedor en contacto con el líquido; y  $h$  ( $\text{W/m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}$ ) es el coeficiente convectivo (del líquido o del aire según corresponda).

$$\Delta T = T_a - T_A \quad (3)$$

$$\Delta T = T_1 - T_L \quad (4)$$

$$Q = A h \Delta T \quad (5)$$

### 2.3. Cálculo del flujo de calor respecto a las resistencias

El flujo de calor ( $Q$ , kJ) es calculado en función del gradiente de temperatura  $\Delta T$  y de los *coeficientes térmicos* ( $k$ ,  $h$ ) que contribuyen al valor de las *resistencia térmica global* ( $R$ ,  $^{\circ}\text{C/W}$ ) del aire, agua y del material se determinó mediante las Ecuaciones 6, 7, 8 y 9. Donde  $x$  (m) es el espesor del contenedor,  $h_L$  ( $\text{W/m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}$ ) y  $h_a$  ( $\text{W/m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}$ ) son los coeficientes convectivos del líquido y el aire, respectivamente;  $T_a$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) y  $T_L$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) son las temperaturas del ambiente y del líquido en contacto con el contenedor, respectivamente;  $k$  ( $\text{W/m } ^{\circ}\text{C}$ ) es la conductividad térmica del material;  $A$  ( $\text{m}^2$ ) es el área de la sección del contenedor en contacto con el líquido;  $m$  (kg) es la masa del líquido;  $C_p$  ( $\text{kJ/kg } ^{\circ}\text{C}$ ) es la capacidad calorífica del líquido; y  $T_1$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) y  $T_2$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) son las temperaturas en dos lapsos de tiempo (tiempo finito: etc).

$$R = (1/h_L A) + (x/k A) + (1/h_a A) \quad (6)$$

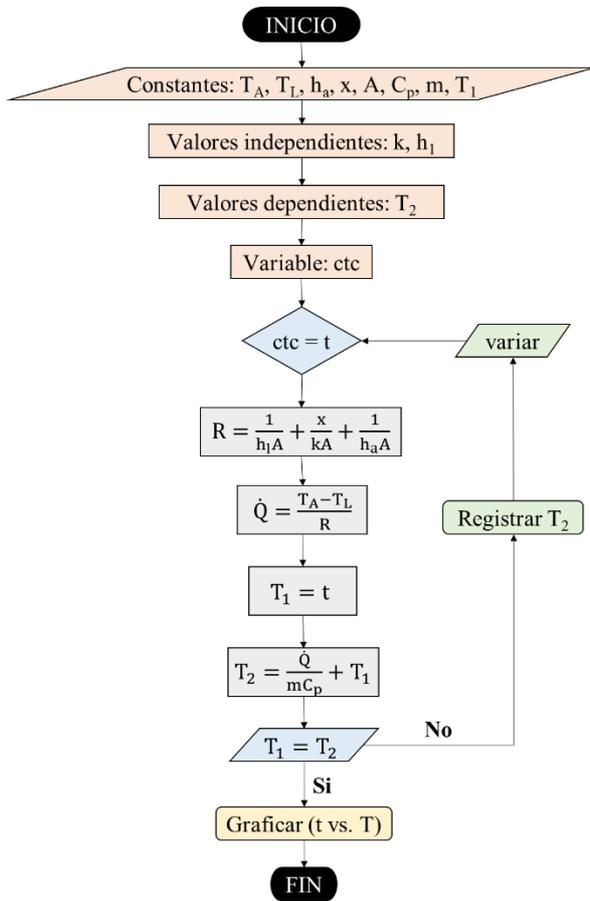
$$\Delta T = T_a - T_L \quad (7)$$

$$Q = \Delta T / R \quad (8)$$

$$Q = m C_p (T_2 - T_1) \quad (9)$$

### 2.4. Simulación de transferencia de calor

La simulación del flujo de calor ante variaciones en el tiempo finito, la conductividad térmica y la convección, se llevó a cabo mediante el software de lenguaje de programación científica, GNU Octave 6.2. Para lo cual, se emplearon las Ecuaciones 1-9, se asignaron valores y se siguió el diagrama de la Figura 3 para generar las iteraciones.



**Figura 3. Diagrama condicional para las iteraciones con variaciones en el tiempo finito, la conductividad térmica y la convección.**

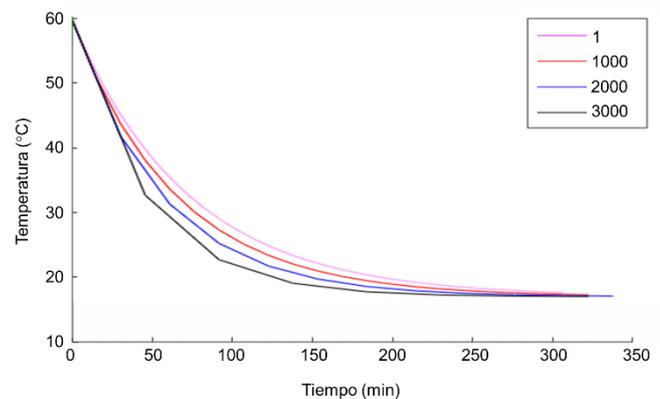
### 3. Resultados

Durante la etapa previa a la atomización, la muestra líquida a ser procesada en el equipo de secado por aspersión, es mantenida en un contenedor de alimentación, si posee una mayor temperatura, con respecto a los alrededores, tendrá pérdida de calor (enfriamiento), típicamente, este enfriamiento tiene un comportamiento exponencial decreciente, que se puede predecir a través de cálculos numéricos discretos a un tiempo finito (ctc), si se conocen las propiedades térmicas de transferencia como la capacidad calorífica ( $C_p$ ) de la muestra, conductividad térmica ( $k$ ) del material del contenedor y los coeficientes de convección de la dispersión líquida ( $h_i$ ) y el aire ( $h_a$ ) que rodea el contenedor.

#### 3.1. Efecto del tiempo finito durante el enfriamiento del agua que alimenta un proceso de secado por aspersión

En la Figura 4 se muestra la predicción por cálculos numéricos del historial térmico, de un contenedor de alimentación de un equipo de secado por aspersión para diferentes valores de ctc. Las curvas presentan decaimiento exponencial, típico del enfriamiento del agua en un tanque o sistema sin agitación (Liang, Zhao, Li, & Zhai, 2020); que responde a la Ley de enfriamiento de Newton (Ortega & Juan Rosales, 2018). En las curvas se aprecia que, al inicio del proceso (0-50 min), el enfriamiento es más rápido en comparación con el término del proceso (250-350 min), lo cual puede verificarse, con la variación en los valores de sus pendientes. Esto se debe a que el flujo de calor de enfriamiento para un valor establecido de resistencia térmica depende del gradiente de temperatura del sistema con relación a la temperatura

de los alrededores (Singh & Heldman, 2009), de tal manera que se ve reflejado como una disminución del cambio de la temperatura del sistema, en función del tiempo y subsecuentemente del gradiente de temperatura. Para encontrar el tiempo discreto y predecir adecuadamente el comportamiento de enfriamiento y disminuir el uso de recursos informáticos (memoria y tiempo de cálculo), se evaluaron diferentes valores de ctc. Por ejemplo, la curva en color púrpura esta discretizada a 1 s, lo que significa que en ese intervalo de tiempo finito se estima la cantidad de calor que pierde el sistema y se calcula de manera iterativa el cambio de temperatura que presenta el agua del contenedor de alimentación. De esta manera este comportamiento, es el resultado del corto tiempo finito de un segundo, en el que se considera el gradiente de temperatura existente entre el sistema y los alrededores para el cálculo de flujo de calor de salida. En el caso de las curvas en color rojo, azul y negro, el ctc, propuesto fue mucho más amplio, de 1000, 2000 y 3000 s, respectivamente. En las curvas obtenidas, se observa el mismo comportamiento de enfriamiento con decaimiento exponencial, sin embargo, se predice un enfriamiento más rápido debido a que se toma en cuenta el mismo gradiente de temperatura por periodos más largos (1000, 2000 o 3000 s) (Khoie, 2005). Es decir, el empleo de un ctc largo, aleja la predicción del comportamiento experimental, mientras que con un valor de ctc más cercano a 1 s, permite tener un comportamiento aproximado al fenómeno real (Dow, 1999), que en este caso ocurre en la dispersión líquida que alimenta el proceso de secado por aspersión. De hecho, cálculos realizados para ctc de 10 y de 0.01 s, produjeron curvas solapadas a la obtenida con 1 s. En un lapso de 100 min, el uso de un ctc de 0.01 s, requiere 600,000 iteraciones de cálculo y para 10 s 600 iteraciones, de ahí que se deba tomar en consideración el equilibrio entre aproximación al fenómeno real y en específico, la capacidad del ordenador en procesamiento, memoria y almacenamiento.



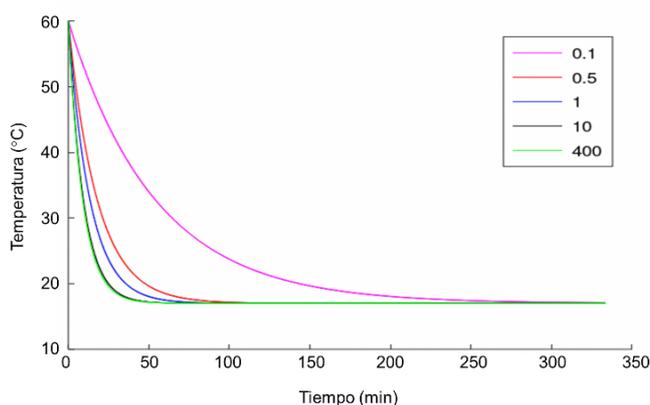
**Figura 4. Efecto del tiempo finito (ctc = 1, 1000, 2000 y 3000 s) en el historial térmico de enfriamiento del agua que alimenta un proceso de secado por aspersión. Condiciones:  $T_A = 60^\circ\text{C}$ ,  $T_L = 17^\circ\text{C}$ ,  $h_a = 25 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ,  $h_i = 100 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $k = 1.2 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ,  $x = 3 \text{ mm}$ .**

#### 3.2. Efecto de la conductividad durante el enfriamiento del agua que alimenta un proceso de secado por aspersión

En la Figura 5 se muestra la predicción por cálculos numéricos del historial térmico, de un contenedor de alimentación de un equipo de secado por aspersión para diferentes valores de  $k$ . Al igual que en la Figura 4, las curvas presentan un comportamiento de decaimiento exponencial descrito por la Ley de enfriamiento de

Newton. De acuerdo con las Ecuaciones 6-9, el flujo de calor está en función de los *coeficientes térmicos* del sistema que contribuyen a la *resistencia térmica global*; misma que, es el resultado de la suma del cociente del espesor del material del contenedor con su conductividad térmica y la inversa de los coeficientes convectivos del líquido y el aire (Ecuación 6). Debido a esto si un valor es considerablemente más pequeño respecto a los otros *coeficientes térmicos*, este tendrá la inversa mayor y será más grande su contribución a la *resistencia térmica global* con lo que gobernara el proceso de transferencia de calor, en tanto valores cercanos entre los cocientes llevaran a que más de un coeficiente térmico contribuya a gobernar la transferencia de calor. Esto es relevante en calidad de que para poder estudiar el efecto de un *coeficiente térmico* se deben disminuir los demás. Por el motivo explicado en la Figura 5 se observa que si la conductividad térmica del contenedor tiene valores más bajos ( $<0.5 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$ ) que los valores de los coeficientes convectivos del líquido ( $h_l$ ) y el aire ( $h_a$ ), la resistencia térmica dependerá del material del contenedor; mientras que, si la  $k$  tiene valores altos ( $\geq 10 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$ ) que los valores de  $h_l$  y  $h_a$ , la resistencia térmica dependerá de los fluidos, este es el motivo de que la curva negra y azul estén solapadas. Aunado a esto, se observa que independientemente de la gobernanza de la  $k$  o  $h_l$  y  $h_a$  sobre la resistencia térmica, la velocidad de enfriamiento dependerá del valor de la *resistencia térmica global*. Es decir, al tener una *resistencia térmica global* alta, la velocidad de enfriamiento será lenta, tal como se observa en la curva color púrpura. Por el contrario, si la *resistencia térmica global* es baja, la velocidad de enfriamiento será rápida (curvas en color rojo, azul y negro).

Las curvas presentadas en la Figura 5 surgen a partir de valores de  $k$  de 0.1, 0.2, 0.5, 10 y 400  $\text{W/m } ^\circ\text{C}$ , lo cual cubre un intervalo amplio de materiales. Típicamente, el contenedor empleado en los procesos de secado por aspersión está elaborado de vidrio (1.05  $\text{W/m } ^\circ\text{C}$ ); sin embargo, se pueden emplear de otros materiales como tereftalato de polietileno (0.3  $\text{W/m } ^\circ\text{C}$ ), porcelana (1.5  $\text{W/m } ^\circ\text{C}$ ), o cobre (380  $\text{W/m } ^\circ\text{C}$ ) (MPC, 2021). No obstante, la  $k$  del material del contenedor afectará considerablemente la velocidad de enfriamiento del líquido que contiene si el líquido se encuentra con agitación o aireación.

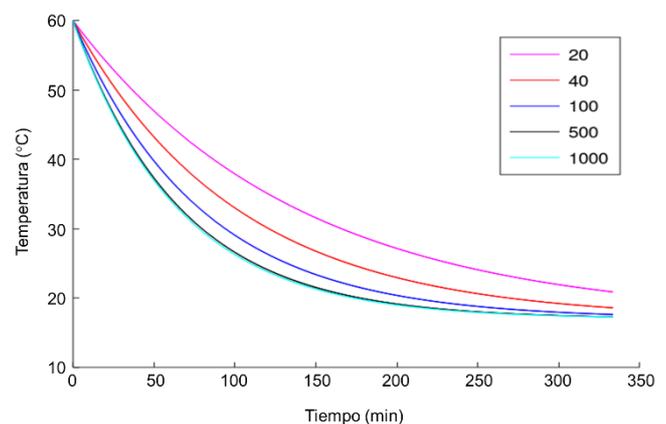


**Figura 5. Efecto de la conductividad del contenedor ( $k = 0.1, 0.5, 1, 10$  y  $400 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$ ) en el historial térmico de enfriamiento del agua que alimenta un proceso de secado por aspersión. Condiciones:  $T_A = 60^\circ\text{C}$ ,  $T_L = 17^\circ\text{C}$ ,  $h_a = 200 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$ ,  $h_l = 1000 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $\text{ctc} = 10 \text{ s}$ ,  $x = 3 \text{ mm}$ .**

### 3.3. Efecto de la convección durante el enfriamiento del agua que alimenta un proceso de secado por aspersión

En la Figura 6 se muestra la predicción por cálculos numéricos del historial térmico, de un contenedor de alimentación de un equipo de secado por aspersión para diferentes valores del  $h_l$ . Las curvas presentan un comportamiento de decaimiento exponencial con diferentes pendientes, atribuidas a las variaciones en el coeficiente térmico  $h_l$  que hacen referencia a la agitación o estado estático del contenido. El  $h_l$  indica la facilidad o dificultad a la transferencia de calor del líquido en todas las caras del contenedor que están en contacto directo con él, de tal manera que, si  $h_l$  tiene valores bajos, el enfriamiento del líquido será lento; por el contrario, si el  $h_l$  tiene valores altos, el enfriamiento será rápido y eventualmente la resistencia dejará de depender de este coeficiente y entonces dependerá del material del contenedor y la ventilación que experimente. Este fenómeno se visualiza en las curvas, donde se observa que las pendientes se presentan con mayor declive (curva color púrpura, roja, azul y negra, respectivamente) conforme el coeficiente  $h_l$  aumento entre 20, 40, 100 y 500  $\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ , sin embargo, con un  $h_l$  de 500 y 1000  $\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$  el coeficiente dejó de gobernar el proceso y dejó de existir un cambio considerable (curva color negro y cian, respectivamente).

Por consiguiente, cuanto mayor sea el  $h_l$ , menor influirá en la *resistencia térmica global* lo cual se ve reflejado en el aumento en la velocidad de enfriamiento siempre que exista buena conductividad del material del contenedor y ventilación. De esta forma la presente simulación de resultados puede soportar la toma de decisiones sobre el tipo de material idóneo para la alimentación de un secado por aspersión, donde la transferencia de calor depende del líquido, el ambiente y la agitación del sistema. De tal manera, que se pueda optar por el uso de un material aislante específico y tomar decisiones sobre la potencia necesaria de una fuente de calentamiento el control de una fuente calórica con el propósito final de mejorar el rendimiento energético que disminuya el costo del proceso.



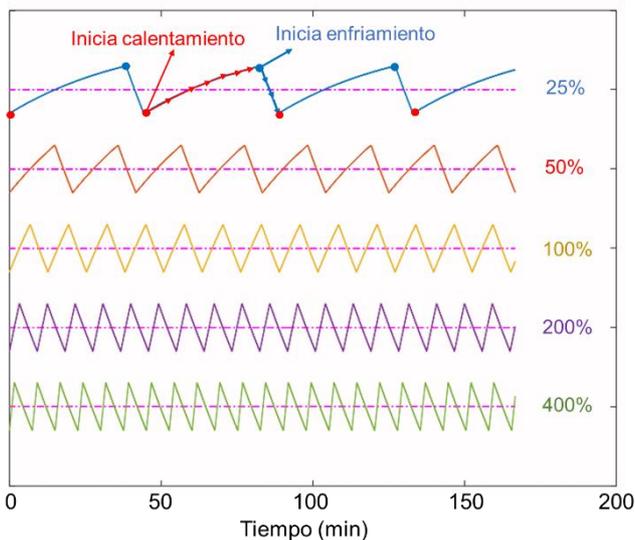
**Figura 6. Efecto de la convección del líquido ( $h_l = 20, 40, 100, 500$  y  $1000 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) en el historial térmico de enfriamiento del agua que alimenta un proceso de secado por aspersión. Condiciones:  $T_A = 60^\circ\text{C}$ ,  $T_L = 17^\circ\text{C}$ ,  $h_a = 25 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$ ,  $k = 1.2 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$ ,  $\text{ctc} = 10 \text{ s}$ ,  $x = 3 \text{ mm}$ .**

### 3.4. Simulación del control de temperatura del contenedor de alimentación del equipo de secado por aspersión

En la Figura 7 se muestra la predicción por cálculos numéricos del historial térmico, de un contenedor de alimentación de un equipo

de secado por aspersión donde se busca controlar su temperatura para mantenerla dentro de un rango a través de ciclos alternados de enfriamiento y calentamiento. El enfriamiento esta dado por los

coeficientes térmicos y las condiciones de temperatura del sistema, mientras que el calentamiento es suministrado por una fuente de energía que podría ser una resistencia eléctrica. El comportamiento del historial térmico se simuló con diferentes valores de energía (25, 50, 100, 200 y 400%) suministrada para mantener controlado el sistema en un punto de ajuste fijo ( $P_{af}$ ) de  $60 \pm 2^\circ\text{C}$  (líneas punteadas color purpura). De tal manera que el aumento en el porcentaje de energía suministrada al sistema para calentar el agua aumenta el número de ciclos en el proceso. Esto significa que, si se suministra energía al sistema con una fuente externa de calor de tal manera que, el sistema gane más energía de la que la que va perdiendo por el efecto convectivo y conductivo (Secciones 3.2 y 3.3), la respuesta variará en función de la energía aplicada. Por ejemplo, la curva en color azul representa el comportamiento en ciclos (calentamiento-enfriamiento) para mantener el control de temperatura entre  $58$  y  $62^\circ\text{C}$  al suministrar la energía perdida por el sistema más el 25% de esta energía, esta misma idea aplica para los demás porcentajes, de manera que durante un lapso de 10,000 segundos entre calentamiento y enfriamiento ocurrirán 3.76 ciclos. Las curvas en color rojo, amarillo, morado y verde corresponden al 50, 100, 200 y 400% de suministro de energía para el control de temperatura, los cuales corresponden a 7.90, 13.14, 18.2 y 22.25 ciclos, respectivamente. Como se aprecia en las curvas, cuando se duplica la energía adicional de calentamiento no se duplican los ciclos; sin embargo, cuanto menor sea esta energía adicional habrá menos ciclos, es decir menos momentos de encendido y apagado de la resistencia.

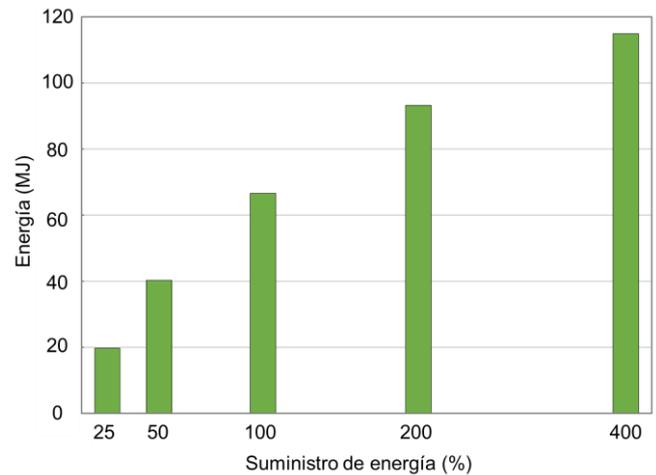


**Figura 7. Efecto del sistema de control de temperatura ( $P_{af} = 60 \pm 2^\circ\text{C}$ ) del agua que alimenta un proceso de secado por aspersión. Condiciones:  $h_a = 50 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ,  $h_l = 200 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $k = 1 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ,  $x = 3 \text{ mm}$ .**

La Figura 8 muestra la relación no lineal que existe entre el porcentaje de la energía suministrada para el calentamiento (25, 50, 100, 200 y 400%) y el consumo de energía generado para mantener controlado el sistema a  $P_{af}$  de  $60 \pm 2^\circ\text{C}$ . Como se aprecia, al utilizar valores mayores de energía para el calentamiento, aun cuando ocurren dentro del mismo rango de control de temperatura consumen más energía para el mismo

resultado, de tal manera que, con 25, 50, 100, 200 y 400%, el consumo de energía respectivo fue de 19.7, 40.2, 66.5, 93.2 y 114.9 MJ. Al comparar el consumo de energía al suministrar el 25% respecto al 400% existe un requerimiento de energía 5.83 veces mayor para mantener la temperatura del sistema controlada,

lo cual implica 5.83 veces un mayor costo por consumo de energía. De esta manera conocer el comportamiento del enfriamiento permite saber el valor de energía a partir del cual hay que establecer el porcentaje adicional que hay que suministrar al contenedor de alimentación para implementar condiciones de calentamiento que sean económicas y que mejoren la eficiencia del proceso.



**Figura 8. Relación de la energía (%) suministrada al sistema para el control de temperatura ( $P_{af} = 60 \pm 2^\circ\text{C}$ ) del agua que alimenta un proceso de secado por aspersión respecto al gasto de energía global (MJ). Condiciones:  $h_a = 50 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ,  $h_l = 200 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $k = 1 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ,  $x = 3 \text{ mm}$ .**

De acuerdo con el análisis del gasto energético para el sistema de calentamiento del contenedor de alimentación del secador por aspersión, las condiciones  $h_a = 50 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ,  $h_l = 200 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $k = 1 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ,  $x = 3 \text{ mm}$  y un suministro de energía de 25% propician un ahorro de energía del ~83% (~100 MJ). Con lo cual se asegura mantener la temperatura estable a  $60^\circ\text{C}$  durante todo el tiempo de proceso (200 min) con un menor número de ciclos.

#### 4. Conclusiones

El secado por aspersión ha demostrado ser un proceso versátil en la conservación de componentes de fuentes vegetales, algunos de ellos tienen un alto valor biológico, pero presentan estructuras termolábiles, por ejemplo, los antioxidantes. Por consiguiente, es importante la compresión de cada componente de este proceso térmico para mejorar su eficiencia, uno de ellos es el contenedor de alimentación del equipo que requiere energía para mantener su temperatura. En este sentido el presente trabajo demostró que el conocimiento del historial térmico de enfriamiento en el contenedor de alimentación de un equipo de secado por aspersión para diferentes valores de coeficientes térmicos y condiciones de temperatura permite la toma de decisiones oportunas antes de diseñar un proceso para pruebas experimentales. Por un lado, el conocimiento de las velocidades de enfriamiento respecto a la variación de los coeficientes térmicos permite una mejor selección en los materiales del contenedor, establecer condiciones de agitación y predecir el impacto de la interacción con el aire

circundante para conocer las pérdidas de energía. Por otro lado, el análisis de la temperatura en un sistema controlado por medio de un punto de ajuste fijo permite determinar que porcentajes de fuentes de calor respecto al valor de las pérdidas son adecuadas para mantener la temperatura deseada sin un gasto excesivo de

energía. De tal manera que, la simulación y control de la transferencia de calor en el contenedor de alimentación del secador por aspersión mediante cálculos numéricos permite predecir comportamientos cambiando las variables involucradas para obtener múltiples situaciones que permitan seleccionar las condiciones más adecuadas, para que se puedan implementar estos procesos con el menor costo posible en consumo de energía.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias al apoyo de la Cátedras COMECyT (CAT2021-0219).

## Referencias

- Al-juhaimi, F., Ghafoor, K., Özcan, M. M., Jahurul, M. H. A., Babiker, E. E., Jinap, S., Sahena, F., Sharifudin, M. S., & Zaidul, I. S. M. (2018). Effect of various food processing and handling methods on preservation of natural antioxidants in fruits and vegetables. *Journal of Food Science and Technology*, 55(10), 3872–3880. DOI: 10.1007/s13197-018-3370-0
- Angiolillo, L., Del Nobile, M. A., & Conte, A. (2015). The extraction of bioactive compounds from food residues using microwaves. *Current Opinion in Food Science*, 5, 93–98. DOI: 10.1016/j.cofs.2015.10.001
- Dow, J. O. (1999). General Introduction. In J. O. Dow (Ed.), *A Unified Approach to the Finite Element Method and Error Analysis Procedures*. Academic Press, Inc. San Diego, CA. Ch. 1, pp. xi–xxiv.
- Fang, Z., & Bhandari, B. (2017). Spray Drying of Bioactives. In Y. Roos & Y. Livney (Eds.), *Engineering Foods for Bioactives Stability and Delivery*. Springer, New York, NY. Ch. 10, pp. 261–284.
- Finlay, W. H. (2019). Particle size changes due to evaporation or condensation. In W. H. Finlay (Ed.), *The Mechanics of Inhaled Pharmaceutical Aerosols*. Academic Press, Inc. Suffolk, UK. Ch. 4, pp. 53–101.
- Hamzalioglu, A., & Gökmen, V. (2016). Interaction between Bioactive Carbonyl Compounds and Asparagine and Impact on Acrylamide. In V. Gökmen (Ed.), *Acrylamide in Food: Analysis, Content and Potential Health Effects*. Academic Press, Inc. San Diego, CA. Ch. 18, pp. 355–376.
- Khoei, A. R. (2005). Error Estimation and Adaptivity. *Computational Plasticity in Powder Forming Processes*. Elsevier Ltd. Oxford, UK. Ch. 6, pp. 175–209.
- Liang, W., Zhao, J., Li, Y., & Zhai, Y. (2020). Research on the fractal characteristics and energy dissipation of basalt fiber reinforced concrete after exposure to elevated temperatures under impact loading. *Materials*, 13(8), 1902. DOI: 10.3390/MA13081902
- MPC: Material Properties Contributors. (23 de agosto de 2021). *Thermal Conductivity of Materials*. Material Properties contributors. <https://material-properties.org/thermal-conductivity-of-materials/>
- Ortega, A., & Juan Rosales, J. (2018). Newton's law of cooling with fractional conformable derivative. *Revista Mexicana de Física*, 64(2), 172–175. DOI: 10.31349/revmexfis.64.172
- Papalia, T., Sidari, R., & Panuccio, M. R. (2019). Impact of Different Storage Methods on Bioactive Compounds in *Arthrospira platensis* Biomass. *Molecules*, 24, 2810. DOI: 10.3390/molecules24152810
- Rivas, J. C., Cabral, L. M. C., & Rocha-Leão, M. H. (2020). Stability of Bioactive Compounds of Microencapsulated Mango and Passion Fruit Mixed Pulp. *International Journal of Fruit Science*, 20(S2), S94–S110. DOI: 10.1080/15538362.2019.1707746
- Santos, D., Maurício, A. C., Sencadas, V., Santos, J. D., Fernandes, M. H., & Gomes, P. S. (2017). Spray Drying: An Overview. In R. Pignatello (Ed.), *Biomaterials - Physics and Chemistry - New Edition*. Intech Open. Ch. 2, pp. 9–35.
- Singh, R. P., & Heldman, D. R. (2009). *Introduction to Food Engineering*. Elsevier Inc. China.
- Sridhar, K., Inbaraj, B. S., & Chen, B.-H. (2021). Recent Advances on Nanoparticle Based Strategies for Improving Carotenoid Stability and Biological Activity. *Antioxidants*, 10(5), 713. DOI: 10.3390/antiox10050713
- Tran, T. T. A., & V.H. Nguyen, H. (2018). Effects of Spray-Drying Temperatures and Carriers on Physical and Antioxidant Properties of Lemongrass Leaf Extract Powder. *Beverages*, 4(4), 84. DOI: 10.3390/beverages4040084