

Transferencia de calor en el contenedor de alimentación del secador por aspersión Heat transfer in the feed container of the spray dryer

E. Díaz-Montes ^{a,*}, J.A. Martínez Hernández^a, G.I. Cerón-Montes ^a, E.A. Vargas-León ^a

^aDivisión 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

El secado por aspersión es el método de encapsulación que más se emplea para la conservación de componentes bioactivos, por lo que el mercado de equipos de secado se ha diversificado, mediante el desarrollo de modelos de diferentes capacidades, tamaños y parámetros operativos, que permite su uso en el área médica, farmacéutica y alimentaria, en función de las características de las cápsulas (p. Ej., tamaño, morfología y características fisicoquímicas). El nano secador por aspersión BÜCHI B-90, es el equipo en el mercado con más ventajas, en cuanto a rendimiento (hasta 90%) y tamaño de partículas (entre 0.3 y 5 µm), sin embargo, su diseño de aspersión conformado por una malla vibratoria genera un cizallamiento en la solución que recircula al contenedor de alimentación, lo que podría afectar los componentes termosensibles. Por lo anterior, el objetivo del trabajo fue determinar la transferencia de calor en el contenedor de alimentación de acuerdo con la variación del material y el flujo, en un sistema que simula la recirculación de un nano secador por aspersión BÜCHI B-90.

Palabras Clave: Secado por aspersión, Conducción, Convección, Transferencia de calor, Enfriamiento.

Abstract

Spray drying is a widely used method for encapsulation to conserve bioactive compounds, for this reason the drying equipment market has diversified through the development of models of different capacities, sizes, and operating parameters, this allows its use in areas like medical, pharmaceutical and foods, depending on the characteristics of the capsules (e.g., size, morphology, and physicochemical characteristics). The nano spray dryer BÜCHI B-90 is the best equipment on the market with several advantages over other equipment in terms of performance (up to 90%) and particle size (between 0.3 and 5 µm). However, its design made up of a vibrating mesh generates a shear in the solution that recirculates to the feed container, this could affect the thermosensitive compounds. Therefore, the aim of the work was to determine the heat transfer in the feeding container according to the variation of the material and the flow, in a system that simulates the recirculation of a nano spray dryer BÜCHI B-90.

Keywords: Spray drying, Conduction, Convection, Heat transfer, Cooling.

1. Introducción

El secado por aspersión es el proceso que más se emplea para la encapsulación de componentes bioactivos, debido a su simplicidad, rapidez y precio comercial (Nedovic et al., 2011; Đorđević et al., 2015). Durante este proceso, una solución líquida (1) pasa a través del cabezal (2) donde se calienta y atomiza a la cámara de secado (3); el contacto con aire caliente evapora el disolvente de la solución y los sólidos se transportan a la cámara de recolección (4) (Santos et al., 2017), como se esquematiza en la Figura 1.

Los secadores comerciales BÜCHI (Labortechnik AG) y GEA Niro (Process Engineering A/S), tienen diferentes

diseños, cabezales de pulverización (p. Ej., tecnología de pienzo, ultrasónicos, tobera de dos sustancias, rotatorio o modo fuente), recolectores (p. Ej., electrostático o ciclón), volúmenes (p. Ej., nivel laboratorio o escala piloto) y parámetros operativos (BÜCHI, 2022). Aunque el secado por aspersión se emplea en la industria alimentaria, cosmética y farmacéutica para conservar componentes activos, antioxidantes, sabores, enzimas y proteínas (Patel et al., 2014), la selección del tipo de secador depende de la fuente y las características del componente, así como las propiedades que se desee conservar (Anish et al., 2014; Tobar-Grande et al., 2013).

*Autor para la correspondencia: elsadimo123@gmail.com

Correo electrónico: elsadimo123@gmail.com (Elsa Díaz-Montes), jazmin.martinez.uaeh@gmail.com (Jazmín Areli Martínez Hernández), ivan_gcm@hotmail.com (Genaro Iván Cerón-Montes), enain_32@hotmail.com (Enaim Aída Vargas-León)

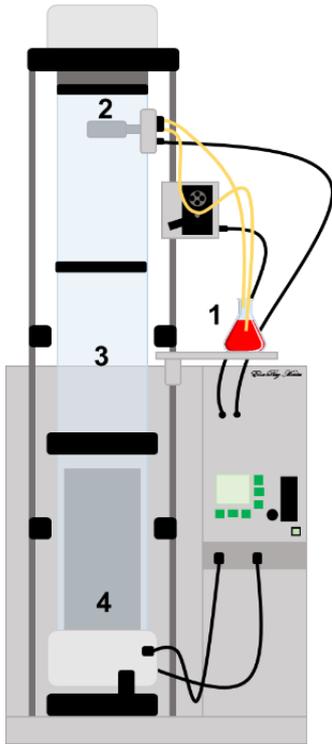


Figura 1. Esquema de un nano secador por aspersión BÜCHI B-90.

En la Tabla 1 se describen las principales características de los secadores por aspersión comerciales y sus aplicaciones, como se puede ver, el equipo B-90 (BÜCHI) tiene mayores ventajas de rendimiento, y tamaño de partícula, sobre los otros dos modelos; sin embargo, una limitante del dispositivo es que la malla vibratoria del cabezal de pulverización, provoca un cizallamiento mecánico de atomización durante la recirculación de la solución, lo cual puede ser perjudicial para aquellos componentes termosensibles (Sosnika & Seremeta, 2015).

Tabla 1. Principales diferencias entre los secadores por aspersión comerciales. Adaptado de Sosnika & Seremeta, 2015; Solanas Laboaragón, 2015.

Característica	Nano (BÜCHI B-90)	Mini (BÜCHI B-290)	Piloto (GEA Niro)
Volumen máximo	0.2 L	1 L	10 L
Tamaño de partícula	0.3-5 μm	2-25 μm	2-80 μm
Rendimiento	hasta 90%	60-90%	80%
Temperatura máxima de entrada	120°C	220°C	350°C
Tobera	Cabezal de pulverización	De dos sustancias	Atomizador rotatorio
Separador	Colector electrostático	Ciclón	Ciclón
Ventaja principal	Muestras pequeñas	Uso en laboratorio	Aumento de producción
Aplicación principal	Farmacéutica	Farmacéutica	Alimentaria

Por lo anterior, el objetivo del presente estudio fue desarrollar un proceso de simulación, del efecto de cizallamiento mecánico que se genera en el secador por aspersión BÜCHI B-90, mediante un sistema de recirculación, para determinar y calcular la transferencia de calor en el líquido de alimentación.

2. Metodología

2.1. Caracterización de los contenedores y el flujo de alimentación

Los contenedores se caracterizaron mediante la medición de sus dimensiones en tres secciones diferentes, con un vernier digital con precisión de 0.01 mm (YUGENER), de acuerdo con su diámetro superior (D), diámetro inferior (d), altura (h) y espesor (x). Los resultados se expresan en mm.

El sistema para simular el efecto de cizallamiento mecánico, que se genera en el secador por aspersión BÜCHI B-90, se montó como se ilustra en la Figura 2. El sistema empleó una bomba peristáltica (7553-70, Cole-Parmer Instrument Company) y una tubería de 1 m de largo y 7.9 mm de diámetro interior (Masterflex® 06508-35, Pharmed® BPT). El sistema recirculó agua a diferentes potencias de la bomba peristáltica y flujo de alimentación se calculó mediante la relación volumen y tiempo, por lo que los resultados se expresan en mL/s.

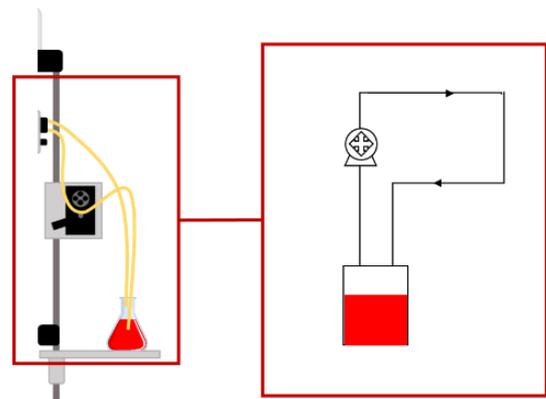


Figura 2. Diagrama del sistema de simulación de recirculación de alimentación de un nano secador por aspersión BÜCHI B-90.

2.2. Cinéticas de transferencia de calor

Las cinéticas de transferencia de calor se realizaron siguiendo un diseño de experimentos completamente al azar, con el cual se obtuvieron 30 corridas al variar el material del contenedor (poliestireno expandido (EPS), poliestireno expandido con aluminio (EPS-AL), vidrio de sílice (VS), vidrio borosilicato (VB), polipropileno (PP) y cerámica de loza (CL)) y el flujo de recirculación del sistema (F1, F2, F3, F4 y F5). En cada experimento el contenedor se llenó con 250 mL de agua a 60°C y se recirculó en una tubería de 1 m de largo y 7.9 mm de diámetro interior (Masterflex® 06508-35, Pharmed® BPT). Las mediciones de temperatura se realizaron con un termómetro de alcohol (KAYALABS) en periodos de 5 min durante 60 min.

2.3. Simulaciones de la transferencia de calor

Las simulaciones de la transferencia de calor se llevaron a mediante el programa informático, Microsoft Excel 365. Para lo cual, se emplearon las Ecuaciones 1-3, que engloban la *Ley de Fourier* (conducción), la *Ley del Enfriamiento de Newton* (convección) y el *Primer Principio de la Termodinámica* (conservación de la energía) (Díaz-Montes et al., 2021).

$$R_T = (1/h_1 A) + (x/k A) + (1/h_a A) \quad (1)$$

$$q = \Delta T/R_T \quad (2)$$

$$q = \dot{m} C_p (T_2 - T_1) \quad (3)$$

Donde h_1 ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$) y h_a ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$) son los coeficientes de convección del líquido y el aire, respectivamente; k ($W/m \text{ } ^\circ C$) es la conductividad térmica del material; A (m^2) es el área de contacto; \dot{m} (g/s) es el flujo másico; C_p ($J/g \text{ } ^\circ C$) es el calor específico del líquido; ΔT ($^\circ C$) es la diferencia de temperatura entre el sistema y el ambiente; T_1 ($^\circ C$) y T_2 ($^\circ C$) son las temperaturas inicial y final en el sistema, respectivamente; R_T ($^\circ C/W$) es la resistencia térmica del sistema y q (W) es la transferencia de calor.

Para la simulación se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Transferencia de calor por convección y conducción
- Conducción térmica constante
- Convección térmica constante
- Transferencia de calor por radiación insignificante
- Transferencia de calor por la base insignificante
- Flujo multidimensional
- Estado estacionario
- Volumen constante

2.4. Análisis de correlación y análisis estadístico

El análisis de correlación de los datos teóricos calculados se determinó mediante la herramienta de Análisis de Datos proporcionado por el programa informático, Microsoft Excel 365. Los experimentos se realizaron por triplicado y los resultados se expresan como la media \pm desviación estándar (DE). Se realizó un análisis de varianza unidireccional (ANOVA) y análisis de correlación usando el Sistema de Análisis Estadístico (SAS Institute Inc.). Para comparar las medias se utilizaron las pruebas de rangos múltiples de Tukey. Se consideraron significativas las diferencias entre las medias de $p < 0.05$.

3. Resultados

3.1. Caracterización de los contenedores de alimentación

La caracterización de los contenedores de alimentación se presenta en la Tabla 2. Las dimensiones (D, d, h y x) permitieron determinar las áreas involucradas en los procesos de transferencia de calor. De acuerdo con las leyes de *Fourier*

y *Newton* (Ortega and Juan Rosales, 2018; Finlay, 2019), las especificaciones dimensionales de los materiales involucrados en los procesos térmicos son necesarias para el cálculo de transferencia de calor por conducción y convección, respectivamente (Ecuaciones 1 y 2).

Tabla 2. Caracterización de los contenedores con base en su diámetro superior (D), diámetro inferior (d), altura (h) y espesor (x).

Material	Dimensiones (mm)			
	D	d	h	x
EPS	83.45 \pm	50.85 \pm	101.94 \pm	3.29 \pm
	0.14	0.48	0.16	0.08
PP	78.91 \pm	64.83 \pm	121.06 \pm	1.43 \pm
	0.32	0.42	0.23	0.01
CL	81.58 \pm	81.16 \pm	96.40 \pm	3.63 \pm
	0.36	0.14	0.17	0.01
VS	75.50 \pm	64.81 \pm	117.29 \pm	4.46 \pm
	0.10	0.13	0.29	0.01
VB	66.70 \pm	63.79 \pm	117.85 \pm	2.66 \pm
	0.07	0.09	0.036	0.05
AL	-	-	-	0.2 \pm
				0.00

EPS: poliestireno expandido; PP: polipropileno; CL: cerámica de loza; VS: vidrio de sílice; VB: vidrio borosilicato; AL: aluminio. Los resultados están expresados con la media \pm DE para cada muestra ($n = 3$).

3.2. Flujo de alimentación con recirculación

Los resultados de los flujos de recirculación se muestran en la Tabla 3, como se puede ver no existe una tendencia proporcional de aumento entre los flujos, por ejemplo, la diferencia entre los flujos F1 y F2 fue de 1.4 mL/s, mientras que entre los flujos F2 y F3, así como entre los flujos F3 y F4 fue de 1.8 mL/s, y entre los flujos F4 y F5 fue de 2.1 mL/s. Estas velocidades se determinaron con la finalidad de establecer una relación entre la velocidad del flujo y la posible adquisición de temperatura, por efecto de la fricción entre el líquido y la pared de la tubería de recirculación.

Tabla 3. Caracterización del flujo de recirculación.

Determinación	Flujo (mL/s)
F1	0.92 \pm 0.01
F2	2.32 \pm 0.01
F3	4.14 \pm 0.03
F4	5.94 \pm 0.06
F5	8.00 \pm 0.04

Los resultados están expresados con la media \pm DE para cada muestra ($n = 3$).

De acuerdo con Anaya-Durand et al. (2014), el traslado del fluido a través de la tubería genera fuerzas de rozamiento, dadas por el fluido (p. Ej., tipo y velocidad) y las características de la tubería (p. Ej., dimensiones y materiales), las cuales provocan fricción entre ambas partes del sistema (fluido-tubería). Cuanto mayor es la velocidad de fluido, mayor es la turbulencia en su núcleo, por lo que se necesita un mayor esfuerzo cortante para impedir el movimiento, y por ende la fricción aumenta en el sistema (Brunone et al. 2020).

3.3. Efecto del flujo en la transferencia de calor

En las Figuras 3 y 4 se pueden ver los resultados de las cinéticas de transferencia de calor en el sistema que simula el contenedor de alimentación del secador por aspersión BÜCHI B-90, ante las variaciones en las velocidades de flujo (F1, F2, F3, F4 y F5) y los distintos contenedores (EPS, VS, VB, PP y CL). En ambas cinéticas se puede ver un decaimiento exponencial independiente del material del contenedor y de la velocidad del flujo, lo cual refleja un enfriamiento respecto al tiempo de proceso. En las cinéticas destacan tres periodos importantes, el periodo de inicio (0 a 15 min) con una pendiente negativa ($m < 0$); el periodo intermedio (20 a 40 min) con una reducción en la velocidad de enfriamiento; mientras que el periodo final (45 a 60 min) termina como una

pendiente menos pronunciada que se acerca a la neutralidad ($m = 0$). Sin embargo, al analizar estadísticamente la transferencia de calor en cada gráfico se obtuvieron variaciones significativas.

En la Figura 3 se pueden ver las cinéticas de enfriamiento en el líquido de cada contenedor, al variar las velocidades de los flujos. El análisis estadístico indicó que la variación en la velocidad del flujo (de F1 a F5) no afectó la pérdida de temperatura del líquido.

Estos resultados sugieren, que el rozamiento generado por el esfuerzo cortante (esfuerzo que se aplica en forma paralela la cara del material (Fancher & Levitan, 2020)), que se provocó al recircular el líquido a través de la tubería no generó suficiente fricción para aumentar significativamente la temperatura del sistema.

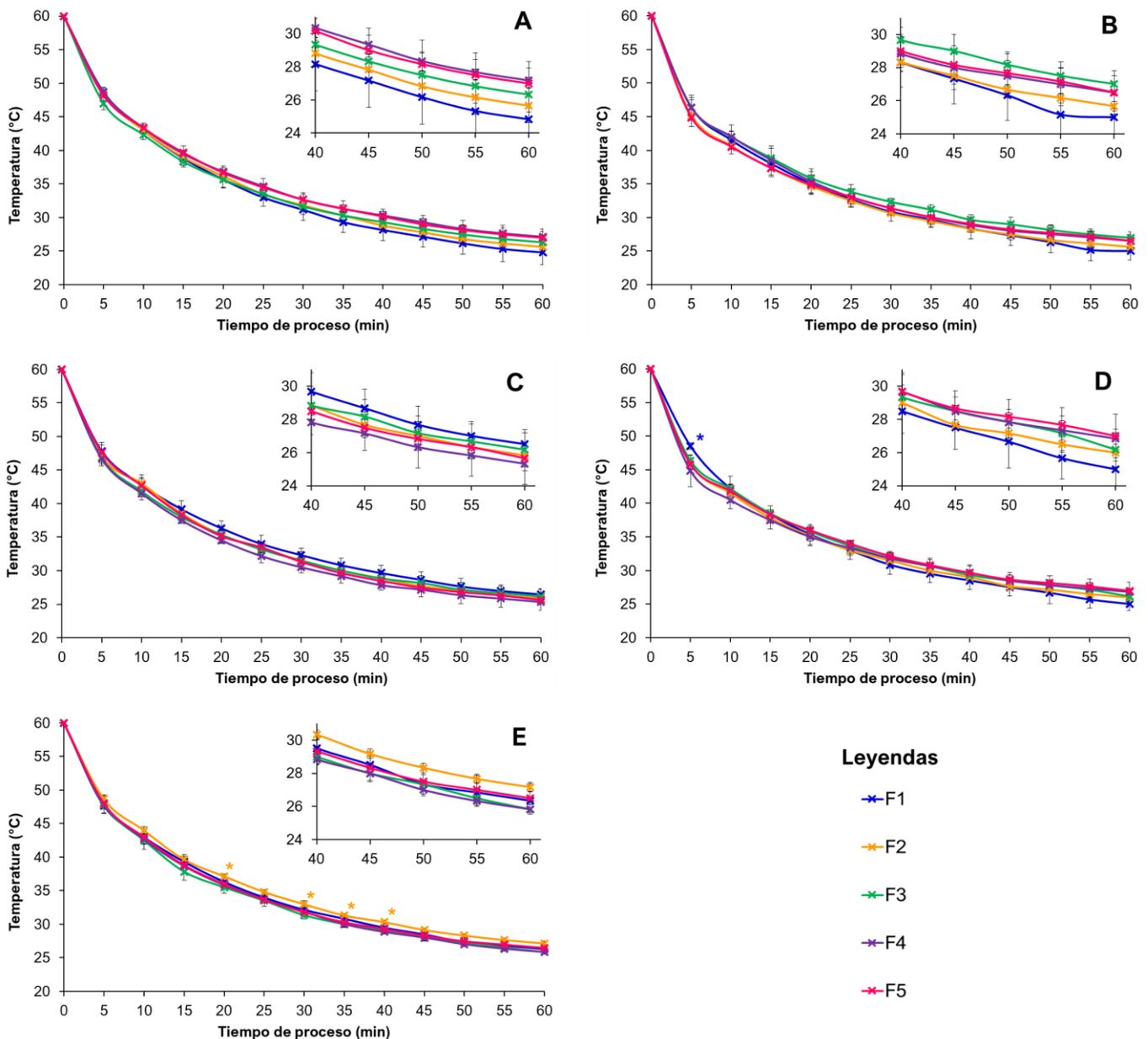


Figura 3. Cinéticas de transferencia de calor que establecen el efecto del flujo de recirculación en la temperatura del líquido en los diferentes contenedores. A: poliestireno expandido (EPS); B: polipropileno (PP); C: cerámica de loza (CL); D: vidrio de sílice (VS); E: vidrio borosilicato (VB). Los resultados están expresados con la media \pm DE para cada muestra ($n = 3$). El asterisco (*) representa una diferencia significativa que concuerda en el color de la leyenda de acuerdo con la prueba de Tukey. Leyendas: F1 - flujo 1, F2 - flujo 2, F3 - flujo 3, F4 - flujo 4, F5 - flujo 5.

Además, la peristalsis (funcionamiento que aplica presión al fluido para pasarlo a través de un estrangulamiento que corre a lo largo de la tubería (Watson-Marlow, 2022)) que se generó en el núcleo de la bomba peristáltica tampoco fue suficiente para aumentar la temperatura del líquido que pasó a través de ella. No obstante, al analizar las cinéticas individualmente (Figura 3), se encontraron las principales diferencias, debido a que las velocidades de enfriamiento descienden numéricamente diferente, tal como se muestra en el análisis de correlación de la Tabla 4. Las curvas se ajustaron a un modelo polinomial de cuarto orden (y) con un ajuste muy fiable ($R^2 > 0.9$). El análisis de correlación indica que las variables analizadas (temperatura y tiempo de proceso) varían en dirección opuesta ($sxy < 0$) y son inversamente proporcional ($r < 0$), es decir, conforme aumenta el tiempo de proceso la temperatura en el líquido disminuye. Los datos experimentales están alejados de una tendencia lineal ($s^2 > \text{media}$) pero la desviación entre las variables es relativamente pequeña ($e < 5$).

Sin embargo, al analizar las cinéticas por periodos (inicio y

final), se encuentran las principales diferencias numéricas, por ejemplo, el líquido en el contenedor de EPS (Figura 3A) tuvo el enfriamiento más rápido (ca. $1.40^\circ\text{C}/\text{min}$) en el flujo F3 y más lento (ca. $1.32^\circ\text{C}/\text{min}$) en el flujo F5; mientras que, al final de las cinéticas el enfriamiento más rápido fue al emplear el flujo F1 (ca. $0.16^\circ\text{C}/\text{min}$) y el más lento con el flujo F5 (ca. $0.13^\circ\text{C}/\text{min}$). La temperatura del líquido en el contenedor de PP (Figura 3B) en el periodo de inicio, decreció más rápido (ca. $1.45^\circ\text{C}/\text{min}$) en el flujo F4 y más lento en el flujo F1 (ca. $1.35^\circ\text{C}/\text{min}$), mientras que, en el periodo final la temperatura disminuyó más rápido al emplear el flujo F1 (ca. $0.14^\circ\text{C}/\text{min}$) y más lento con el flujo F4 (ca. $0.12^\circ\text{C}/\text{min}$). El líquido en el contenedor de CL (Figura 3C), tuvo en el periodo de inicio el enfriamiento más rápido (ca. $1.45^\circ\text{C}/\text{min}$) con el flujo F2 y el más lento con el flujo F3 (ca. $1.36^\circ\text{C}/\text{min}$), mientras que, en el periodo final la temperatura descendió más rápido con el flujo F1 (ca. $0.16^\circ\text{C}/\text{min}$) y la más lento con el flujo F4 (ca. $0.10^\circ\text{C}/\text{min}$).

Tabla 4. Parámetros estadísticos (ecuación (y), coeficientes de determinación (R^2) y correlación (r), covarianza (sxy), varianza (s^2) y error típico (e)) de las cinéticas de transferencia de calor de las Figuras 3 y 4.

Contenedor	Flujo	Ajuste polinomial		Correlación			
		y	R^2	r	sxy	s^2	e
EPS	F1	$9 \times 10^{-06}x^4 - 0.0013x^3 + 0.0768x^2 - 2.2911x + 59.455$	0.998	-0.914	-172.564	240.730	4.447
	F2	$1 \times 10^{-05}x^4 - 0.0015x^3 + 0.0833x^2 - 2.3395x + 59.385$	0.998	-0.912	-166.474	238.567	4.365
	F3	$1 \times 10^{-05}x^4 - 0.0017x^3 + 0.0936x^2 - 2.4864x + 59.135$	0.995	-0.894	-156.923	234.689	4.564
	F4	$1 \times 10^{-05}x^4 - 0.0015x^3 + 0.0823x^2 - 2.2952x + 59.417$	0.998	-0.905	-157.244	236.620	4.285
	F5	$1 \times 10^{-05}x^4 - 0.0015x^3 + 0.0840x^2 - 2.3074x + 59.285$	0.996	-0.907	-157.756	236.379	4.265
PP	F1	$1 \times 10^{-05}x^4 - 0.0016x^3 + 0.0882x^2 - 2.3827x + 59.258$	0.996	-0.905	-159.167	236.142	4.354
	F2	$1 \times 10^{-05}x^4 - 0.0016x^3 + 0.0878x^2 - 2.4108x + 59.109$	0.994	-0.901	-161.987	236.379	4.529
	F3	$1 \times 10^{-05}x^4 - 0.0018x^3 + 0.0974x^2 - 2.5517x + 59.138$	0.995	-0.890	-156.987	234.431	4.666
	F4	$1 \times 10^{-05}x^4 - 0.0017x^3 + 0.0956x^2 - 2.5773x + 59.147$	0.995	-0.888	-161.603	235.729	4.852
	F5	$1 \times 10^{-05}x^4 - 0.0015x^3 + 0.0865x^2 - 2.4121x + 59.278$	0.996	-0.901	-163.718	237.205	4.584
CL	F1	$1 \times 10^{-05}x^4 - 0.0019x^3 + 0.1010x^2 - 2.6036x + 59.051$	0.994	-0.900	-163.397	235.852	4.605
	F2	$1 \times 10^{-05}x^4 - 0.0021x^3 + 0.1103x^2 - 2.7352x + 58.800$	0.990	-0.880	-154.679	232.571	4.861
	F3	$1 \times 10^{-05}x^4 - 0.0019x^3 + 0.1005x^2 - 2.5410x + 58.951$	0.992	-0.889	-150.769	232.661	4.519
	F4	$1 \times 10^{-05}x^4 - 0.0017x^3 + 0.0931x^2 - 2.4867x + 58.918$	0.992	-0.886	-155.064	233.837	4.706
	F5	$2 \times 10^{-05}x^4 - 0.0022x^3 + 0.1148x^2 - 2.7772x + 58.716$	0.988	-0.868	-147.244	230.331	4.890
VS	F1	$9 \times 10^{-06}x^4 - 0.0014x^3 + 0.0825x^2 - 2.3967x + 59.488$	0.998	-0.905	-167.628	238.735	4.588
	F2	$1 \times 10^{-05}x^4 - 0.0020x^3 + 0.1053x^2 - 2.6421x + 58.926$	0.992	-0.888	-155.321	233.243	4.682
	F3	$1 \times 10^{-05}x^4 - 0.0017x^3 + 0.0953x^2 - 2.4925x + 58.908$	0.992	-0.894	-154.679	233.624	4.513
	F4	$2 \times 10^{-05}x^4 - 0.0024x^3 + 0.1209x^2 - 2.8338x + 58.779$	0.989	-0.869	-145.192	229.757	4.807
	F5	$1 \times 10^{-05}x^4 - 0.0020x^3 + 0.1041x^2 - 2.5820x + 58.819$	0.990	-0.885	-149.359	231.916	4.572
VB	F1	$1 \times 10^{-05}x^4 - 0.0016x^3 + 0.0874x^2 - 2.3631x + 59.196$	0.996	-0.908	-160.833	236.574	4.318
	F2	$9 \times 10^{-06}x^4 - 0.0014x^3 + 0.0788x^2 - 2.2264x + 59.366$	0.997	-0.911	-158.974	237.441	4.187
	F3	$1 \times 10^{-05}x^4 - 0.0016x^3 + 0.0886x^2 - 2.4545x + 59.372$	0.997	-0.897	-160.897	236.332	4.606
	F4	$1 \times 10^{-05}x^4 - 0.0016x^3 + 0.0870x^2 - 2.3965x + 59.332$	0.997	-0.906	-163.718	237.385	4.453
	F5	$1 \times 10^{-05}x^4 - 0.0015x^3 + 0.0834x^2 - 2.3492x + 59.305$	0.997	-0.900	-160.064	236.576	4.498

EPS: poliestireno expandido; PP: polipropileno; CL: cerámica de loza; VS: vidrio de sílice; VB: vidrio borosilicato. Los resultados están expresados con la media para cada muestra ($n = 3$).

Durante el periodo de inicio, la temperatura del líquido en el contenedor de VS (Figura 3D), decreció con mayor velocidad (ca. $1.44^{\circ}\text{C}/\text{min}$) con el flujo F4 y más lento con el flujo F3 (ca. $1.37^{\circ}\text{C}/\text{min}$), mientras que, en el periodo final la velocidad de decremento de temperatura fue más rápida con el flujo F1 (ca. $0.17^{\circ}\text{C}/\text{min}$) y la más lenta con el flujo F4 (ca. $0.11^{\circ}\text{C}/\text{min}$). Finalmente, el líquido en el contenedor de VB (Figura 3E), se enfrió más rápido (ca. $1.44^{\circ}\text{C}/\text{min}$) al emplear el flujo F3 y con menor rapidez (ca. $1.31^{\circ}\text{C}/\text{min}$) con el flujo F2, y en el periodo final la velocidad de decremento de temperatura más rápida fue con el flujo F3 (ca. $0.15^{\circ}\text{C}/\text{min}$) y la más lenta (ca. $0.12^{\circ}\text{C}/\text{min}$) con el flujo F5.

Estos resultados demuestran que, conforme más rápido fue el decremento de temperatura en el periodo de inicio, más rápido se logró la estabilización térmica del sistema, lo cual concuerda con la *Ley del Enfriamiento de Newton* (Díaz-Montes et al., 2021), que establece que ocurre una

transferencia de temperatura por convección entre el líquido y sus alrededores o viceversa cuando hay diferencia de temperaturas (Bergman et al., 2011). En el caso de los experimentos, la temperatura de inicio del líquido (60°C) fue superior a la del ambiente, y el efecto de recirculación no le adicionó temperatura extra, por lo que eventualmente ocurrió un enfriamiento.

3.4. Efecto del material en la transferencia de calor

En la Figura 4 se pueden ver las cinéticas de temperatura del líquido conforme a variaciones en las velocidades del flujo. El análisis estadístico estableció diferencias significativas en relación con la velocidad del flujo, dependiendo del periodo que se analizó (inicio y final).

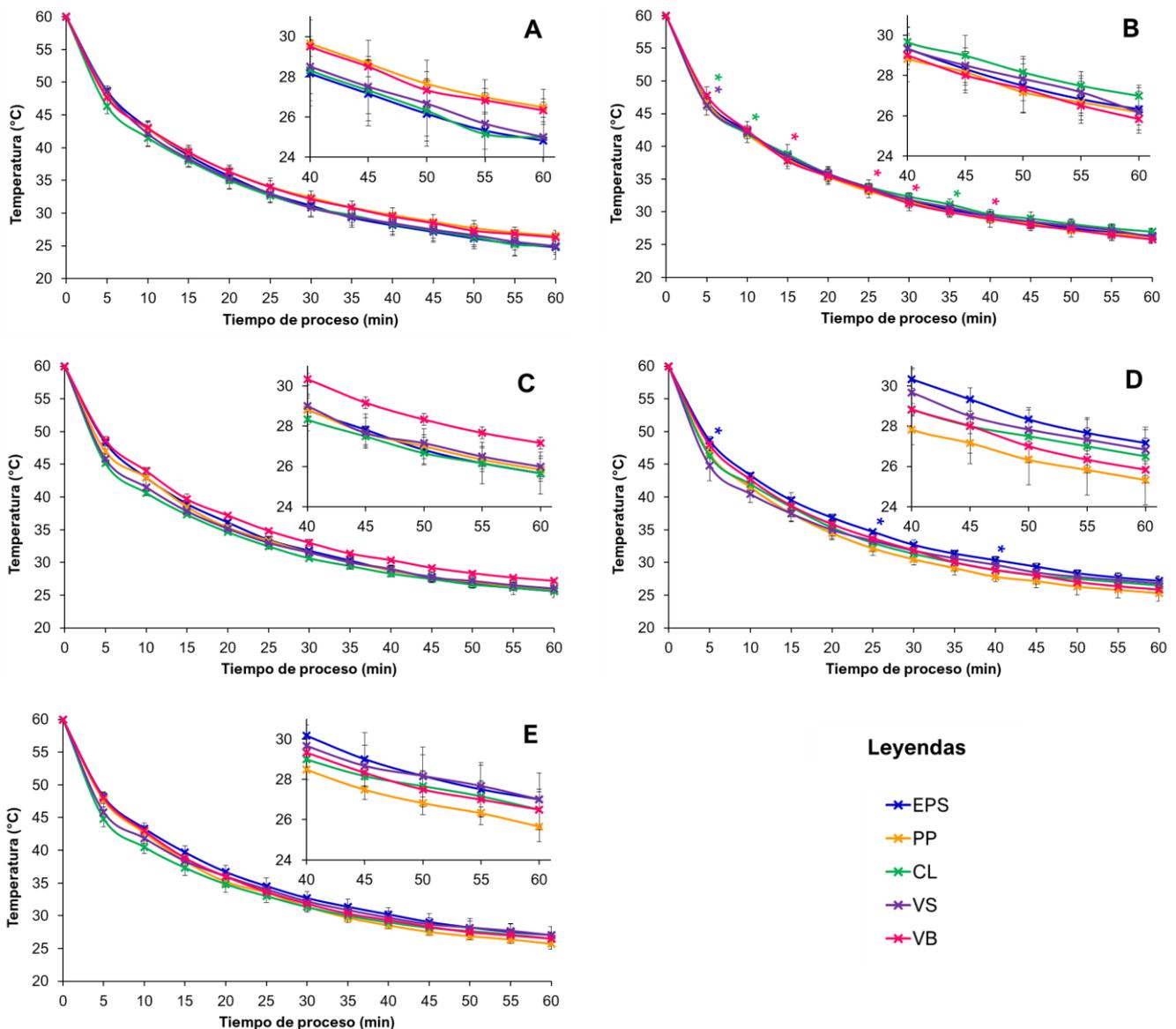


Figura 4. Cinéticas de transferencia de calor que establecen el efecto del material del contenedor en la temperatura del líquido. A: flujo 1 (F1); B: flujo 2 (F2); C: flujo 3 (F3); D: flujo 4 (F4); E: flujo 5 (F5). Los resultados están expresados con la media \pm DE para cada muestra ($n = 3$). El asterisco (*) representa una diferencia significativa que concuerda en el color de la leyenda de acuerdo con la prueba de Tukey. Leyendas: EPS - poliestireno expandido, PP - propileno, CL - cerámica de loza, VS - vidrio de sílice, VB - vidrio borosilicato.

Durante los primeros 5 minutos del proceso, todos los líquidos tuvieron un enfriamiento (18.3-25.3%) sin importar el tipo de contenedor y a partir de los 5 min las temperaturas de los líquidos fueron diferentes. Por ejemplo, los líquidos recirculados con los flujos F1 (de 48.67 hasta 24.83°C), F3 (48.33-25.67°C) y F5 (48.17-25.67°C) no mostraron diferencias significativas en sus temperaturas en ningún contenedor, respecto a cada periodo de tiempo evaluado. En el flujo F2 durante el periodo de inicio hubo una menor velocidad de descenso de temperatura en el líquido de los contenedores de VB (de 48.67-27.33°C), EPS (48.33-25.67°C) y PP (47.00-25.88°C), mientras que la temperatura se perdió más rápido en los líquidos de los contenedores de VS (45.83-26.00°C) y CL (45.17-25.67°C); en el periodo final no se presentó una diferencia significativa entre las temperaturas. En el flujo F4 en el periodo inicial, la temperatura de los líquidos en los contenedores de EPS (48.67-27.17°C) se mantuvo más alta en comparación con el resto de los materiales (44.83-25.33°C); sin embargo, en el periodo final la temperatura ya no mostró diferencias significativas.

La transferencia de calor por conducción ocurre particularmente en sólidos, respondiendo a la *Ley del Fourier*, que afirma que, ocurre la transferencia de calor de la zona de mayor temperatura a la de menor temperatura (Bergman et al., 2011). Sin embargo, esta transferencia está influenciada por la composición, la pureza y la estructura tridimensional del material (Abu-Eishah, 2001).

Los materiales de los contenedores que se utilizaron en este trabajo cuentan con una gran diversidad de arreglos tridimensionales, por ejemplo, el PP es un termoplástico semicristalino conformado de cadenas largas de propileno, que tiene propiedades térmicas y mecánicas que influyen en su alto nivel de rigidez y fusión (Maddah, 2016). El vidrio (VS y VB) es un material amorfo conformado por una red tridimensional no periódica, que depende de la conformación y pureza del material, el VB es de sílice (SiO_2) y óxido bórico (B_2O_3) que le confiere una resistencia al choque térmico; mientras que el VS está compuesto del 96% de SiO_2 , por lo que es un material altamente resistente al aumento de la temperatura (Reyes Melo & Hinojosa Rivera, 2000). La CL es un material poroso amorfo conformado, principalmente, de loza (material no arcilloso) que tiene resistencia térmica y al choque térmico (Vázquez Malagón, 2005). El AL es un metal cristalino que puede estar en estado puro o en forma de aleaciones (con magnesio, cobre o silicio), por lo que una resistencia a la corrosión y una excelente conductividad térmica (Gitter, 2006). El EPS es una espuma amorfa de cadenas poliméricas de estireno envueltas en burbujas de aire, que disipan la energía térmica y evitan su acumulación, por lo que se considera un aislante térmico (Chen et al., 2015). Estas características tridimensionales de los materiales están asociadas a sus conductividades térmicas (k), ya que mientras el aire inmerso en las redes del EPS evita que transfiera calor ($k = 0.027 \text{ W/m K}$), el AL es considerado un conductor térmico ($k = 205 \text{ W/m K}$) (MPC, 2022).

Además de la influencia de los materiales de los contenedores y las velocidades de flujo de recirculación, los sistemas son influenciados por dos fenómenos, la temperatura del medio ambiente y la temperatura del líquido. De acuerdo con la teoría cinética molecular, donde se explica la discontinuidad de la materia, existe la aseveración de que las moléculas de un material o fluido se encuentran

interaccionando unas con otras, debido a sus fuerzas de atracción o cohesión entre moléculas que se encuentran separadas por espacios intermoleculares; las moléculas tienen movimientos vibratorios y de traslación (energía cinética) debido a su carga energética, provocando choques entre moléculas y eventualmente liberación de energía en forma de calor. Cuando al material o fluido se le aplica temperatura, se disminuye la fuerza de atracción molecular, por lo que el aumento de los espacios intermoleculares y los movimientos vibratorios y de traslación, provoca una mayor liberación de energía cinética. Particularmente en los fluidos, la energía cinética se genera por los choques intermoleculares que ocurren por los movimientos de traslación, debido a que su distribución está mediada por el espacio que los contiene (cerrado o abierto), de tal manera que, los fluidos por sí solos liberan energía cinética sin necesidad de aplicar una energía o fuerza externa (Fan et al., 2013). En los experimentos, el líquido fue sometido a un aumento de temperatura previo al inicio de los ensayos, lo que significa que su energía cinética liberada aumentó respecto a la energía sin calentamiento. Esto sugiere que la liberación de energía calorífica al medio ambiente ocurrió desde el momento en que se dejó de aplicar calor.

Aunado a esto, la transferencia de calor entre el líquido y el ambiente estuvo influenciada por la temperatura ambiental, la cual, se registró entre 16 (mínima) y 28°C (máxima); además, el historial de temperaturas a lo largo de las cinéticas (datos no presentados) permitió relacionar la afectación de la pérdida de temperatura del líquido respecto a la temperatura ambiental, lo que evidencia un efecto directo entre ambas temperaturas. De acuerdo con la *Ley del Enfriamiento de Newton* (Ecuación 2), la transferencia de calor está influenciada por el gradiente de temperatura en el sistema líquido-ambiente, es decir, cuanto mayor sea la temperatura del ambiente, menor será el gradiente de temperatura y por lo tanto la transferencia de calor también será menor.

En procesos contrarios, donde la temperatura ambiental es superior a la del material, existen otros factores que se deben considerar, por ejemplo, el estudio de Miller et al. (2013) demuestra que para que un sólido contenido en una caja cerrada adquiera temperatura del ambiente; es necesario que sus dimensiones sean similares a la caja que lo contiene. Es decir, el sólido debe estar en contacto directo con la mayoría de las caras del contenedor para el fenómeno de conducción acelera la transferencia de calor, independientemente del material conductivo.

3.5. Efecto de los materiales compuestos y sistemas aislados en la transferencia de calor

En la industria de los materiales la búsqueda para generar o desarrollar nuevos materiales con mejores características de resistencia (presión y temperatura), tiene el objetivo particular de disminuir los efectos por corrosión, erosión y abrasión. Además, el empleo de nuevas tecnologías para mejorar la resistencia térmica de los materiales evita en mayor medida la pérdida de energía térmica, por lo que la introducción de materiales combinados o híbridos donde se incluyan materiales aislantes se considera una buena opción (Latorre & Vargas, 2009). En el presente trabajo se modificaron dos sistemas, uno

con materiales compuestos (EPS-AL) y otro cerrado totalmente (EPS-T), para evaluar la transferencia de calor en el líquido contenido. Las cinéticas resultantes de ambos sistemas se pueden ver en la Figura 5. Numéricamente se ve una diferencia en las temperaturas a lo largo de las cinéticas, sin embargo, el análisis estadístico mostró que la diferencia significativa se localiza en el periodo intermedio. El líquido del contenedor de EPS tuvo numéricamente el enfriamiento más acelerado en el periodo de inicio (ca. 1.39°C/min), en el periodo intermedio el contenedor de EPS-T, estadísticamente, tuvo mayor control de la pérdida de calor; mientras que en el periodo final no hubo una diferencia significativa en las temperaturas de los líquidos contenidos.

De acuerdo con las constantes de conductividad térmica de los materiales (EPS y AL), la transferencia de calor se beneficia positivamente, de tal manera que, se esperaba que el recubrimiento de AL en el contenedor de EPS aumentara la conductividad térmica y la velocidad de enfriamiento en el líquido, respecto al contenedor sin recubrimiento (EPS). No obstante, el análisis estadístico estableció que no hubo una diferencia significativa, lo cual puede deberse a que el grosor de la lámina de AL no marco una diferencia respecto al espesor de las paredes del contenedor de EPS; aunado a esto, el aire entre ambos materiales actuó como un material aislante.

Este fenómeno de reducción de la conductividad se ve en materiales combinados, especialmente en las aleaciones, debido al aumento de las impurezas, actuando como centros de dispersión de los movimientos vibratorios; dando como consecuencia la disminución de la transferencia de calor (Abu-Eishah, 2001). En el caso del material EPS-AL, el aire contenido entre ambos materiales actuó como un aislante que redujo la transferencia de calor en el contenedor.

Por otro lado, el empleo de una tapa de EPS (EPS-T) logró aislar totalmente el fluido del aire ambiental y actuar como un aislante, por lo que se esperaba que disminuyera la velocidad de enfriamiento durante toda la cinética; no obstante, el sistema cerrado no marco una diferencia significativa global de transferencia de calor entre un sistema con materiales compuestos o simples.

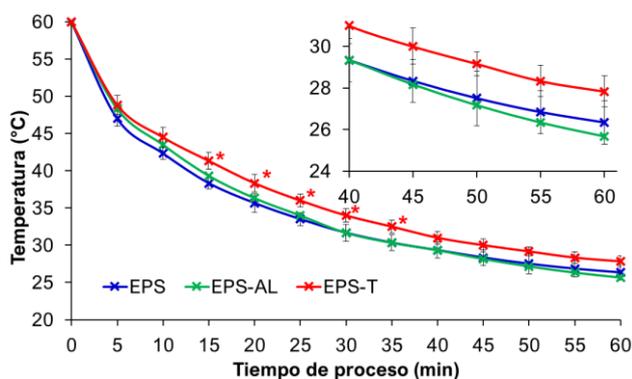


Figura 5. Cinéticas y simulaciones de la temperatura del líquido en contenedor de materiales compuestos y cerrados. Los resultados fueron analizados empleando un flujo de recirculación de 4.14 mL/s y están expresados con la media \pm DE para cada muestra ($n = 3$). El asterisco (*) representa una diferencia significativa que concuerda en el color de la leyenda de acuerdo con la prueba de Tukey. Leyendas: EPS - poliestireno expandido, EPS-AL - poliestireno expandido con aluminio, EPS-T - poliestireno expandido con tapa.

Las curvas de la Figura 5 se ajustaron a un modelo polinomial de cuarto orden (y) con un ajuste muy fiable ($R^2 > 0.9$) (Tabla 5). El análisis indica que las variables analizadas (temperatura y tiempo de proceso) cambian en dirección opuesta ($s_{xy} < 0$) y son inversamente proporcionales ($r < 0$), es decir, conforme aumenta el tiempo de proceso la temperatura en el líquido disminuye. Además, los datos experimentales están alejados de una tendencia lineal ($s^2 > \text{media}$), mientras que, pero la desviación entre las variables es relativamente pequeña ($e < 5$).

3.6. Simulación de la transferencia de calor

La simulación de la transferencia de calor entre el líquido y el medio ambiente asemeja la transferencia que ocurre en un sistema físico, por medio de ecuaciones matemáticas; sin embargo, el fenómeno natural depende de muchas más variables que no pueden ser controladas, por ejemplo, el error del operador y del instrumental (Janjić et al., 2017). En los sistemas simulados se tomaron en cuenta las constantes de conductividad de los materiales (k), los coeficientes convectivos del líquido y del aire (h_l y h_a , respectivamente), y las áreas de cada material involucradas en la transferencia de calor (A) para calcular la resistencia térmica del sistema (R_T) que se conformó de líquido-material-aire (Ecuación 1); y la transferencia de calor de acuerdo con la R_T (Ecuación 2) en cada intervalo de tiempo (Ecuación 3).

Las simulaciones de los sistemas ejecutados se presentan en la Figura 6. Como se puede ver, las curvas tienen un decaimiento exponencial (excepto la curva EPS-T), que indica el enfriamiento del líquido contenido; además de una evidente diferencia entre las velocidades de enfriamiento. El líquido del contenedor de CL tuvo el enfriamiento simulado más acelerado, mientras que el líquido en el contenedor de EPS-T fue más lento. Las cinéticas de enfriamiento simuladas de los líquidos en los contenedores de EPS y EPS-AL fueron totalmente igual, lo cual corrobora la teoría en los ensayos experimentales, de que el espesor de AL no fue significativo para modificar las propiedades térmicas del contenedor.

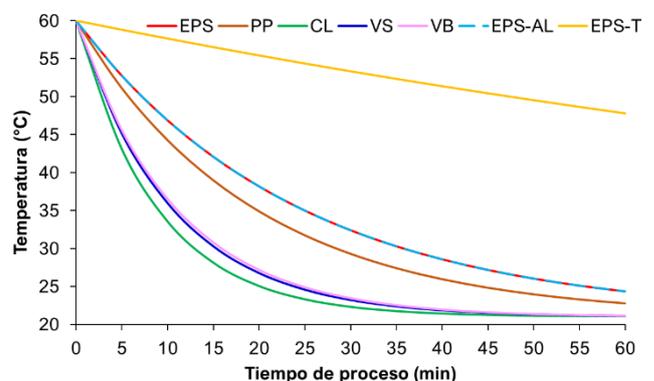


Figura 6. Simulaciones de la temperatura en el líquido en los diferentes contenedores. Los resultados están expresados con la media para cada muestra ($n = 3$). Leyendas: EPS - poliestireno expandido, PP - propileno, CL - cerámica de loza, VS - vidrio de sílice, VB - vidrio, EPS-AL - poliestireno expandido con aluminio, EPS-T - poliestireno expandido con tapa borosilicato, EPS-AL - poliestireno expandido con aluminio, EPS-T - poliestireno expandido con tapa.

Las curvas de la Figura 6 se ajustaron a un modelo polinomial de cuarto orden (y) (excepto la curva EPS y EPS-T) con un ajuste muy fiable ($R^2 > 0.9$) (Tabla 6). El análisis indicó que las variables analizadas (temperatura y tiempo de proceso) varían en dirección opuesta ($s_{xy} < 0$) y son inversamente proporcionales ($r < 0$), es decir, conforme aumenta el tiempo de proceso la temperatura en el líquido disminuye. Los datos experimentales están alejados de una tendencia lineal (excepto la curva EPS y EPS-T) y la desviación entre las variables es relativamente pequeña ($e < 8$).

Al comparar las Figuras 3, 4 y 5 con la Figura 6, es evidente la tendencia decreciente en la temperatura, sin embargo, también es perceptible la diferencia entre las velocidades de enfriamiento.

Estos resultados revelan que, pese a que la simulación es un

acercamiento a los fenómenos naturales, las ecuaciones matemáticas que permiten predecir los comportamientos de transferencia de calor en los sistemas analizados, no consideran todas las variables que afectan la transferencia de calor en la realidad, además cualquier variación en los términos de las ecuaciones arrojan datos diferentes. Por ejemplo, en estudios que implementaron modelos matemáticos para predecir la transferencia de calor en superficies planas al recircular un líquido en forma paralela, concluyeron que la consideración más importante para la predicción fue la geometría de la pared (dimensiones y forma), no obstante, los autores establecieron que cualquier modificación en la forma o dimensión, deriva en un resultado totalmente diferente (El Omari et al., 2011).

Tabla 5. Parámetros estadísticos (ecuación (y), coeficientes de determinación (R^2) y correlación (r), covarianza (s_{xy}), varianza (s^2) y error típico (e)) de las cinéticas de transferencia de calor de la Figura 5.

Contenedor	Ajuste polinomial			Correlación		
	y	R^2	r	s_{xy}	s^2	e
EPS	$1 \times 10^{-05}x^4 - 0.0017x^3 + 0.0936x^2 - 2.4864x + 59.135$	0.995	-0.894	-156.923	234.689	4.564
EPS-AL	$9 \times 10^{-06}x^4 - 0.0013x^3 + 0.0767x^2 - 2.2464x + 59.301$	0.997	-0.914	-166.346	238.767	4.286
EPS-T	$9 \times 10^{-06}x^4 - 0.0014x^3 + 0.0746x^2 - 2.0895x + 59.200$	0.995	-0.922	-157.308	238.236	3.842

EPS: poliestireno expandido, EPS-AL - poliestireno expandido con aluminio, EPS-T - poliestireno expandido con tapa. Los resultados están expresados con la media para cada muestra ($n = 3$).

Tabla 6. Parámetros estadísticos (ecuación (y), coeficientes de determinación (R^2) y correlación (r), covarianza (s_{xy}), varianza (s^2) y error típico (e)) de las cinéticas de transferencia de calor de la Figura 6.

Simulación	Ajuste polinomial			Correlación		
	y	R^2	r	s_{xy}	s^2	e
EPS	$-0.0001x^3 + 0.0238x^2 - 1.5041x + 59.831$	1.000	-0.949	-194.088	253.619	3.740
PP	$3 \times 10^{-06}x^4 - 0.0006x^3 + 0.0457x^2 - 1.9719x + 59.964$	1.000	-0.925	-195.629	252.077	4.675
CL	$2 \times 10^{-05}x^4 - 0.0025x^3 + 0.1462x^2 - 3.8012x + 59.548$	1.000	-0.780	-162.774	247.867	7.597
VS	$1 \times 10^{-05}x^4 - 0.0019x^3 + 0.1184x^2 - 3.3602x + 59.719$	1.000	-0.818	-173.121	248.876	7.075
VB	$1 \times 10^{-05}x^4 - 0.0018x^3 + 0.1123x^2 - 3.2596x + 59.750$	1.000	-0.826	-175.386	249.108	6.942
EPS-AL	$-0.0001x^3 + 0.0238x^2 - 1.5041x + 59.831$	1.000	-0.949	-194.088	253.619	3.740
EPS-T	$-0.2024x + 59.643$	0.997	-0.999	-70.839	333.926	0.213

EPS: poliestireno expandido, PP: polipropileno, CL: cerámica de loza, VS: vidrio de sílice, VB: vidrio borosilicato, EPS-AL - poliestireno expandido con aluminio, EPS-T - poliestireno expandido con tapa.

4. Conclusiones

Hoy en día se están demostradas las ventajas de secar y conservar una gran diversidad de componentes activos mediante secado por aspersión, sin embargo, los procesos de transferencia de calor en todo el proceso, dentro y fuera de la cámara de secado, son inevitables, lo que podría generar degradación o pérdida de actividad. La reducción de la probabilidad de afectación de los componentes termosensibles dentro de la cámara de secado se puede regular con la elección de las condiciones de secado (p. Ej., flujo de alimentación, temperatura de entrada) y los materiales pared para encapsular. Sin embargo, la transferencia de calor en el contenedor de alimentación, usualmente no se controla. En ese sentido, el

presente trabajo demostró que la transferencia de calor que ocurre en el contenedor de alimentación fue negativa, lo que significa que ocurre un enfriamiento, siempre que la temperatura del líquido sea superior a la temperatura del ambiente. Por otro lado, pese a que la simulación es una herramienta que permite predecir comportamientos por medio de modelos matemáticos o ecuaciones de un fenómeno real, sin la necesidad de ejecutarlo; el trabajo demostró que, la simulación de los procesos de enfriamiento en el líquido del contenedor, varían considerablemente respecto a la realidad, lo cual sugiere que en sistemas pequeños como los contenedores empleados, los fenómenos de transferencia de calor no se ven afectados por sus características, hablando de términos de dimensiones, materiales y propiedades termodinámicas.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias al apoyo de Cátedras COMECYT EDOMEX 2021 (CAT2021-0219).

Referencias

- Abu-Eishah, S. I. (2001). Correlations for the thermal conductivity of metals as a function of temperature. *International Journal of Thermophysics*, 22(6), 1855–1868. DOI: 10.1023/A:1013155404019
- Anaya-Durand, A. I., Cauich-Segovia, G. I., Funabazama-Bárceñas, O. & Gracia-Medrano-Bravo, V. A. (2014). *Educación Química*, 25(2), 128–134. DOI: 10.1016/S0187-893X(14)70535-X
- Anish, C., Upadhyay, A. K., Sehgal, D., & Panda, A. K. (2014). Influences of process and formulation parameters on powder flow properties and immunogenicity of spray dried polymer particles entrapping recombinant pneumococcal surface protein A. *International Journal of Pharmaceutics*, 466(1–2), 198–210. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2014.03.025
- Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P. & Dewitt, D. P. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Seventh edition. United States of America: John Wiley & Sons, Inc.
- Brunone, B., Karney, B. W., Mecarelli, M. & Ferrate, M. (2000). Velocity profiles and unsteady pipe friction in transient flow. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 126, 236–244. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(2000)126:4(236)
- BÜCHI: Manual de instrucciones. (6 de febrero de 2022). *Nano Secador por aspersión B-90 HP*. Manual de instrucciones. <https://www.buchi.com/es/productos/instrumentos/nano-spray-dryer-b-90-hp>
- Chen, W., Hao, H., Hughes, D., Shi, Y., Cui, J., & Li, Z.-X. (2015). Static and dynamic mechanical properties of expanded polystyrene. *Materials & Design*, 69, 170–180. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.12.024
- Díaz-Montes, E., Vargas-León, E. A., Garrido-Hernández, A., & Cerón-Montes G. I. (2021) Simulación de la transferencia de calor en el contenedor de alimentación del secador por aspersión y su control de temperatura. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 9(Especial 2), 168–173. DOI: 10.29057/icbi.v9iEspecial2.7947
- Dordević, V., Balanč, B., Belščak-Cvitanović, A., Lević, S., Trifković, K., Kalušević, A., Kostić, I., Komes, D., Bugarski, B., & Nedović, V. (2015). Trends in encapsulation technologies for delivery of food bioactive compounds. *Food Engineering Reviews*, 7(4), 452–490. DOI: 10.1007/s12393-014-9106-7
- El Omari, K. Kousksou, T. & Guer. Y. (2013). Impact of shape of container on natural convection and melting inside enclosures used for passive cooling of electronic devices. *Applied Thermal Engineering*, 31(14–15), 3022–3035. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2011.05.036
- Fan, C.-d., Ouyang, H.-l., Zhang, Y.-j. & Al, Z.-y. (2013) Optimization algorithm based on kinetic-molecular theory. *Journal of Central South University*, 20, 3504–3512. DOI: 10.1007/s11771-013-1875-2
- Fancher, I. S. & Levitan, I. (2020). Endothelial inwardly-rectifying K⁺ channels as a key component of shear stress-induced mechanotransduction. *Current Topics in Membranes*, 85, 59–88. DOI: 10.1016/bs.ctm.2020.02.002
- 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.
- Gitter, R. (2006). Aluminium Materials for Structural Engineering – Essential Properties and Selection of Materials. *Structural Engineering International*, 16(4), 294–300. DOI: 10.2749/101686606778995083
- Janjić, T., Bormann, N., Bocquet, M., Carton, J. A., S., Cohn, E., Dance, S. L., Losa, S. N., Nichols, N. K., Potthast, R., Waller, J. A. & Weston. P. (2018). On the representation error in data assimilation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 144:1257.1278. DOI: 10.1002/qj.3130
- Latorre, G. & Vargas, F. (2009). Materiales compuestos reforzados con cerámicos amorfos para aplicaciones a altas temperaturas. *CT&F Ciencia, Tecnología y Futuro*, 3(5), 175–188.
- Nedovic, V., Kalusevic, A., Manojlovic, V., Levic, S., & Bugarski, B. (2011). An overview of encapsulation technologies for food applications. *Food Science*, 1, 1806–1815. DOI: 10.1016/j.profoo.2011.09.265
- MPC: Material Properties Contributors. (15 de enero de 2022). *Thermal Conductivity of Materials*. Material Properties contributors. <https://material-properties.org/thermal-conductivity-of-materials/>
- Maddah, H. A. (2016). Polypropylene as a Promising Plastic: A Review. *American Journal of Polymer Science*, 6(1), 1–11. DOI: 10.5923/j.ajps.20160601.01
- Miller, T. D., Maxwell, A. J. Lindquist, T. F. & Requard, J. (2013). Validation of Cooling Effect of Insulated Containers for the Shipment of Corneal Tissue and Recommendations for Transport. *Cornea*, 32(1), 63–69. DOI: 10.1097/ICO.0b013e3182685c8e
- 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
- Patel, B., Patel, J., & Chakraborty, S. (2014). Review of Patents and Application of Spray Drying in Pharmaceutical, Food and Flavor Industry. *Recent Patents on Drug Delivery & Formulation*, 8(1), 63–78. DOI: 10.2174/1872211308666140211122012
- Reyes Melo, M. E. & Hinojosa Rivera, M. (2000). Estructura de sólidos amorfos. *Ingenierías*, 3(9), 7–14. ISSN 1405-0676.
- Santos, D., Maurício, A. C., Sencadas, V., Santos, J. D., Fernandes, M. H., & Gomes, P. S. (2017). Spray Drying: An Overview. In Pignatello R. (Ed.), *Biomaterials - Physics and Chemistry - New Edition*. Intech Open. Ch. 2, pp. 9–35.
- Solanas Laboaragón, J. (2015). *Nano Spray Dryer B-90*. Manual de usuario. <https://www.laboaragon.com/marca.php?id=32>
- Sosnik, A. & Seremeta, K. P. (2015). Advantages and challenges of the spray-drying technology for the production of pure drug particles and drug-loaded polymeric carriers. *Advances in Colloid and Interface Science*, 223, 40–54. DOI: 10.1016/j.cis.2015.05.003
- Tobar-Grande, B., Godoy, R., Bustos, P., von Plessing, C., Fattal, E., Tsapis, N., Olave, C., Gómez-Gaete, C. (2013). Development of biodegradable methylprednisolone microparticles for treatment of articular pathology using a spray-drying technique. *International Journal of Nanomedicine*, 8, 2065–2076. DOI: 10.2147/IJN.S39327
- Vázquez Malagón, E. C. (2005). Materiales cerámicos. Propiedades, aplicaciones y elaboración. Centro de Investigaciones de Diseño Industrial. pp. 37–42.
- Watson-Marlow Fluid Technology Group. (19 de marzo de 2022). Bombas peristálticas sanitarias. ¿Cómo funcionan las bombas peristálticas? Sanitarias. <https://www.wmftg.com/es-es/support/how-do-peristaltic-pumps-work-sanitary/>