

ANÁLISIS EXERGÉTICO PARA UN EVAPORADOR MULTIEFECTO DE ALIMENTOS CON TERMOCOMPRESIÓN

EXERGETICAL ANALYSIS FOR A FOOD MULTI-EFFECT EVAPORATOR WITH THERMOCOMPRESSION

Christian O. Díaz-Ovalle^{1,*}, Erika Ramos-Ojeda¹, Fabiola Herrera-Enciso¹ y Florianne Castillo-Borja²

(1) Tecnológico Nacional de México/I. T. Roque, Departamento de Ingenierías, carretera Celaya-Juventino Rosas km 8.0 Celaya, 38124, Guanajuato – México

(2) Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica, Av. López Mateos 1801 Ote, 20256, Aguascalientes - México
(correo de contacto: christian.do@roque.tecnm.mx)

Recibido: 08/08/2022 - Evaluado: 20/08/2022 - Aceptado: 02/09/2022

RESUMEN

El análisis exergético es una estrategia que indica el nivel de aprovechamiento de la energía disponible de un sistema y su relación con los alrededores, esto está vinculado a un valor bajo de exergía destruida (ExD). Esta estrategia ha sido aplicada a plantas de procesamiento de alimentos, incluyendo la evaporación. En este trabajo, un análisis de exergía es desarrollado en un sistema de evaporación con termocompresión, el cual consiste en balances de exergía generalizados para cualquier tipo de secuencia y número de efectos. Un caso de estudio fue tomado de la industria láctea para comprender el cambio de ExD respecto a distintos parámetros del sistema de evaporación. La solución numérica fue posible con el paquete computacional FEVAT ®. Los resultados indicaron que la ExD es reducida: 8% por el aumento de un efecto en la secuencia, 3% por el cambio del efecto que envía vapor al termocompresor y 6% por usar la capacidad calorífica del alimento como constante. El análisis de exergía aporta una descripción mayor sobre la sustentabilidad y eficiencia que pueden presentar los procesos de alimentos.

ABSTRACT

The exergetical analysis indicates the performance level of the available energy in a system and its relation with the environment, which is related to a low value of exergy destruction (ExD). This strategy has been applied to foodstuff processing plants that include evaporation. Herein, an exergetical analysis is developed through a milk evaporation process with thermocompression, which involves generalized exergy balances for any evaporation sequence and quantity of effects. From the dairy industry, a study case was considered to understand the change of ExD to a diversity of parameters from the evaporation system. The numerical solution was possible with the FEVAT ® computational package. The results showed that ExD is reduced: 8% by an increment in the number of effects, 3% by changing the effect that feeds the thermocompressor, and 6% by a constant heat capacity of the foodstuff. The exergy analysis provides an outstanding description of the sustainability and performance of the foodstuff processes.

Palabras claves: balances de energía, exergía destruida, paquete FEVAT, industria láctea

Keywords: energy balances, destroyed exergy, software FEVAT, dairy industry

INTRODUCCIÓN

El procesamiento de alimentos genera un consumo importante de energía, donde los procesos térmicos son los más destacados (Ladha-Sabur *et al.*, 2019). Particularmente, la industria láctea es el mayor consumidor de energía (térmica y eléctrica) en la industria de alimentos (Briam *et al.*, 2015). Por ejemplo, Moejes y van Boxtel (2017) indicaron que el proceso de leche en polvo representa el 15% de la energía consumida en la industria láctea, y el 96% de esa energía corresponde a la etapa evaporación-secado. En este proceso, la etapa de evaporación de alimentos es fundamental y su consumo de energía es considerable (Zhang *et al.*, 2018). Por tal motivo, este proceso es considerado en este estudio.

El proceso de evaporación mitiga el consumo excesivo de energía con mejoras en las condiciones de operación y cambios simples en el equipo, como la aplicación de: sistema multi-efecto, precalentamiento, termocompresión o compresión mecánica (Minton, 1986). El sistema multi-efecto está basado en la interconexión de etapas de evaporación consecutivas, donde el vapor producido en una de las etapas o efectos es la fuente térmica de un efecto subsecuente (Saravacos & Kostaropoulos, 2016). La termocompresión y compresión mecánica logran temperaturas bajas en beneficio de los alimentos termosensibles, lo cual es posible con la mezcla del vapor producido por uno de los efectos y el vapor vivo proveniente de la caldera, así como la inclusión de la compresión mecánica (Morison & Hartel, 2019).

El análisis térmico en evaporadores de alimentos es una guía factible para comprender su situación de consumo energético, y este análisis proviene de los balances de materia y energía. Una lista considerable de investigaciones existe sobre este tema en el área de evaporación (Díaz-Ovalle & Jafari, 2023). En particular, los sistemas multi-efecto demandan balances de materia y energía complejos, que han sido tratados bajo un esquema de modelos generalizados (Chen & Ruan, 2016; Galván-Ángeles *et al.*, 2015). Por otra parte, el análisis térmico de evaporadores ha incluido otras estrategias para reducir el consumo energético, como la reducción de energía bajo un modelado global del proceso (Khanam & Mohanty, 2010), la integración térmica de múltiples efectos (Higa *et al.*, 2009; Jyoti & Khanam, 2014), el frente de Pareto para reducir costos capitales (Sharma *et al.*, 2011), la reducción de consumo de vapor por selección de la ruta térmica (Gautami & Khanam, 2012), etc. No obstante, un análisis de aprovechamiento energético, usualmente de exergía, es una opción válida para describir el efecto de los elementos de diseño sobre el consumo de energía (Dincer & Rosen, 2013).

El análisis exergético ha sido aplicado en la industria de alimentos (Topic, 1995), pero en la evaporación este análisis no es común (Zisopoulos *et al.*, 2017). Inicialmente, Balkan *et al.* (2005) mostraron una estrategia de este análisis en un evaporador de tres efectos para puré de tomate con propiedades variables, y observaron el nivel de degradación de la exergía. Similarmente, Sogut *et al.* (2010) estudiaron un sistema de cuatro efectos de pasta de tomate y observaron que la mayor destrucción de exergía ocurre en el primer efecto. Bapat *et al.* (2013) y Bapat *et al.* (2016), analizaron un evaporador de cinco efectos para la producción de azúcar y observaron que el aumento del punto de ebullición no es favorable al análisis exergético. Mojarab Soufiyan *et al.* (2016), consideraron toda una planta concentradora de puré de tomate con dos efectos en circulación forzada e indicaron que el segundo presenta la mayor destrucción de exergía. Singh *et al.* (2021), aplicaron un análisis 3E (energía-exergía-economía) en el evaporador de tres efectos con termocompresión en una planta de leche en polvo; este análisis describió la alta eficiencia del termocompresor.

Estos trabajos de evaporadores están basados en un número específico de efectos y no describieron el efecto de la posición del termocompresor y la cantidad de los efectos sobre el análisis exergético. Además, la evaporación de alimentos demanda un análisis actualizado del consumo de energía proveniente de la dinámica exergética del sistema. Por lo cual, este trabajo presenta una estrategia de análisis exergético generalizado es planteada considerando el cambio del número de los efectos en un sistema de evaporación y la posición del termocompresor para el caso de una planta procesadora de lácteos.

MATERIALES Y MÉTODOS

La evaporación de múltiple efecto es la interconexión de etapas de evaporación consecutivas, donde el vapor producido en una de las etapas o efectos es la fuente térmica de un efecto subsecuente (Minton, 1986). El consumo de energía por este diseño es menor que el usar un solo efecto; no obstante, el incremento del número de efectos no garantiza bajos costos de inversión (Smith & Jones, 1990). Esto es cuantificable con la determinación de la energía a través del análisis térmico del sistema (principalmente balances de materia y energía), el cual matemáticamente corresponde a ecuaciones algebraicas simultáneas (Lambert *et al.*, 1987). No obstante, el tipo de conexión de un sistema de múltiple efecto diversifica el planteamiento de los balances de materia y energía, lo que genera una dependencia a la trayectoria de los flujos del líquido o del vapor (Galván-Ángeles *et al.*, 2015, Nishitani & Kunugita, 1979). Díaz-Ovalle *et al.* (2013), presentaron un modelo generalizado de este sistema para cualquier tipo de secuencia bajo la trayectoria del líquido, el cual es presentado en la Tabla 1.

Tabla 1: Balances de materia y energía generalizados para un evaporador multi-efecto (Díaz-Ovalle *et al.*, 2013).

índice	Ecuación
$i=1$	$Q_i + V_i(Cp_i T_i - H_i^v) = F(Cp_i T_i - Cp_F T_F)$
$i \neq 1, i \neq n$	$Q_i + (Cp_i T_i - Cp_{i-1} T_{i-1}) \sum_{j=1}^{i-1} V_j + V_i(Cp_i T_i - H_i^v) = F(Cp_i T_i - Cp_{i-1} T_{i-1})$
$i=n$	$Q_i - Cp_{i-1} T_{i-1} \sum_{j=1}^{i-1} V_j - V_i H_i^v = F \left(\frac{x_F}{x_i} Cp_i T_i - Cp_{i-1} T_{i-1} \right)$
Nomenclatura	i : índice de los efectos, n : número de efectos totales, V : flujo de vapor de un efecto, T : temperatura de un efecto, x : fracción másica de sólidos, x_F : fracción másica de sólidos en la alimentación, F : flujo de alimentación, Cp : capacidad calorífica, H^v : entalpía específica de vapor, Q : flujo de energía cedido por la condensación del vapor de calefacción: $Q = \lambda_S S V \lambda_k V_k$, S : flujo de vapor de calefacción, V_k : flujo de vapor del efecto k que calienta al efecto i y λ entalpía específica de condensación.

Un análisis exergético está vinculado al aprovechamiento de la energía del sistema a través de su irreversibilidad y la relación del sistema con los alrededores a ambiente temperatura, T_0 (Dincer & Rosen, 2013). Así, el análisis exergético proviene de los balances de materia y energía. Balkan *et al.* (2005), definen el cálculo de exergía en una corriente de proceso a temperatura T como: $Ex(T) = H(T) - H(T_0) - T_0(S(T) - S(T_0))$, donde Ex es la exergía específica, H es la entalpía específica, T es la temperatura de la corriente y S es la entropía específica; para cambio de fase: $Ex(T^v) = \lambda(T^v) - \lambda(T_0) - T_0(S^v(T^v) - S^v(T_0) - S^l(T_0) + S^l(T_0))$, el superíndice V indica propiedades a las condiciones de vapor saturado y el superíndice L para la fase líquida. La exergía para una corriente con capacidad calorífica (Cp) constante es: $Ex(T) = Cp(T - T_0 - T_0 \ln(T/T_0))$. Además, los balances de exergía generalizados permiten el cálculo de una exergía destruida, ExD , para cada efecto como: $ExD = \sum Ex_{Entrada} - \sum Ex_{Salida}$, interpretando que: a) $ExD > 0$: proceso irreversible, b) $ExD = 0$: proceso en equilibrio con el ambiente, y c) $ExD < 0$: proceso imposible. La Tabla 2 contiene los balances de exergía generalizados para un sistema de evaporación de múltiple efecto, los cuales provienen de los balances de energía de la Tabla 1.

Tabla 2: Balances de exergía generalizados para un evaporador múltiple efeto.

índice	Ecuación
$i=1$	$V_k Ex_{\lambda}(T_k^v) + V_i(Ex(T_i) - Ex(T_i^v)) - F(Ex(T_i) - Ex(T_F)) = ExD_i$
$i \neq 1, i \neq n$	$V_k Ex_{\lambda}(T_k^v) + (Ex(T_i) - Ex(T_{i-1})) \sum_{j=1}^{i-1} V_j + V_i(Ex(T_i) - Ex(T_i^v)) - F(Ex(T_i) - Ex(T_{i-1})) = ExD_i$
$i=n$	$V_k Ex_{\lambda}(T_k^v) - Ex(T_{i-1}) \sum_{j=1}^{i-1} V_j - V_i Ex(T_i^v) - F \left(\frac{x_F}{x_i} Ex(T_i) - Ex(T_{i-1}) \right) = ExD_i$

Un sistema de vacío es fundamental para la evaporación adecuada en alimentos termosensibles. La termocompresión es uno de los mecanismos usados para este fin, donde el vapor de uno de los efectos se mezcla con vapor vivo. Minton (1986), definió un modelo para calcular la presión resultante en un termocompresor, como: $S=0.4 V_T \exp(4.6 \ln(P_M/P_T) \ln(P_S/P_T))$ donde V_T es el flujo de vapor del efecto que envía al termocompresor, P_M es la presión de vapor de mezcla, P_T es la presión del efecto que envía vapor al termocompresor, P_S es la presión del vapor vivo. Para un termocompresor adiabático e ideal: $ExD_{Termo}=Ex(T'_S)-Ex(T'_T)-Ex(T'_M)$.

El análisis exergético total de un sistema de evaporación de múltiple efecto calcula la exergía destruida total como: $ExD_T=\sum ExD+ExD_{Termo}$. Adicionalmente, este análisis involucra parámetros de consumo térmico como la economía de evaporación, EE , la cual es la relación entre el vapor producido total y el vapor vivo consumido: $EE=\sum V/S$. Así, los parámetros ExD_T y EE cuantifican el desempeño exergético-energético del sistema, donde un sistema de evaporación eficiente presenta un valor bajo de ExD_T y un valor alto de EE .

Las propiedades de los alimentos afectan los cálculos de diseño en equipos de transferencia de calor, como ha sido demostrado para el caso de evaporadores (Díaz-Ovalle *et al.*, 2017, Galván-Ángeles *et al.*, 2015). No obstante, el cálculo de exergía involucra solo a la capacidad calorífica. Esta propiedad depende de la cantidad de los componentes del alimento (agua, proteína, carbohidratos, fibra, grasa y ceniza). En la mayoría de los casos, los valores experimentales son limitados, y una solución a esto fue el modelo generalizado con base a la composición propuesto por Choi y Okos (1986). Este modelo determina la capacidad calorífica de un alimento como: $C_p=\sum C_{p_k}x_k$, donde x es la composición del componente k y la expresión de C_{p_k} para cada componente es: $C_{p_k}=A_k+B_kT-C_kT^2$, donde los parámetros A_k , B_k y C_k están contenidos en la Tabla 3.

Tabla 3: Parámetros del modelo de Choi y Okos para el C_{p_k} .

Componente (k)	$A_k \times 10^{-3}$	B_k	$C_k \times 10^3$
Agua	4.1762	-5.3062	-99.516
Proteína	2.0082	1.2089	1.3129
Carbohidratos	1.5488	1.9625	5.9399
Fibra	1.8459	1.8306	4.6509
Grasa	1.9842	1.4733	4.8008
Ceniza	1.0926	1.8896	3.6817

$A_k[=]\text{J}/(\text{kgK})$, $B_k[=]\text{J}/(\text{kgK}^2)$ y $C_k[=]\text{J}/(\text{kgK}^3)$.

La determinación de análisis exergético para la concentración de alimentos involucra los balances de materia, energía y exergía, la termocompresión y el C_p variable. Este trabajo resuelve este problema numéricamente para casos con temperatura conocida. El modelo general es lineal para un sistema de evaporación cuando C_p es constante, pero el cálculo de la presión de mezcla del termocompresor crea no-linealidades cuya solución demanda estrategias numéricas. Así, la solución de este problema matemático fue posible con el software FEVAT® (Galván-Ángeles *et al.*, 2015), que obtuvo la solución del modelo lineal bajo un algoritmo de Gauss bajo un proceso iterativo al incluir el termocompresor con la expresión no-lineal para el cálculo de la temperatura de mezcla. Los resultados provenientes de FEVAT® corresponden a todas las variables del sistema de evaporación, como ExD , EE , S , etc.

El análisis de exergía fue aplicado al caso de estudio indicado por Galván-Ángeles *et al.* (2015), donde un evaporador de cuatro efectos concentra leche y recicla el vapor del segundo efecto hacia el termocompresor. Las características principales del sistema son: a) 16000 kg/h de leche fresca a 80°C y 12.5%, b) producto con 50% de sólidos, c) temperatura de los efectos: I:68°C, II:65°C, III:49.5°C y IV:45°C, d) vapor vivo saturado a 133°C, e) recicle de 10% del vapor producido en el efecto II y f) temperatura ambiente de 24°C. El C_p constante de la leche es 3.849 kJ/(kg°C) (Singh *et al.*, 2009) y la composición de los sólidos de la leche fresca es: 4.95% de carbohidratos, 3.5% de proteínas, 3.5% de grasa y 0.7% de ceniz. La Figura 1 a) esquematiza el proceso de evaporación de este caso de estudio.

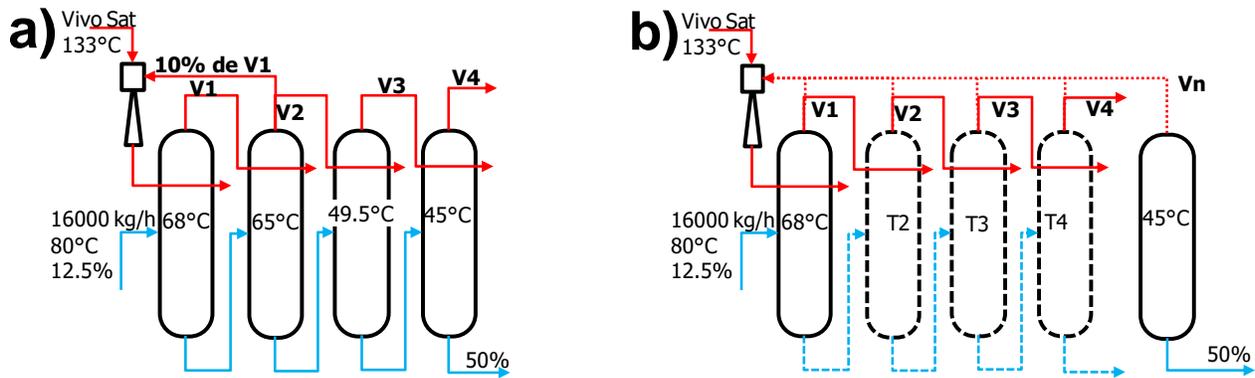


Fig. 1: Representación gráfica del sistema de evaporación del caso de estudio: a) condiciones de operaciones reales y b) propuesta al cambio del número de efectos y ubicación de termocompresor (punteadas).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de este caso de estudio determinó el valor de la exergía destruida total (ExD_T) y la economía de evaporación (EE). Primeramente, el caso de estudio fue resuelto bajo propiedades variables donde la Tabla 4 contiene estos resultados: exergía de entrada ($Ex_{entrada}$), exergía de salida (Ex_{salida}) y exergía destruida (ExD). Los valores mayores de ExD fueron obtenidos en el efecto I (recepción del vapor de calefacción), el efecto III (recepción de vapor después de derivación al termocompresor) y el termocompresor (mezcla de vapores a distintas presiones). El efecto I y el termocompresor describieron valores altos de exergías de entrada y salida por la recepción de vapor. La visualización de la distribución exergética es posible en un diagrama de Grassman-Sankey, que distribuye entre las unidades del sistema las variables: $Ex_{entrada}$, Ex_{salida} y ExD . La Figura 2 contiene este diagrama para el caso de estudio, donde el comportamiento del termocompresor es similar a lo obtenido por Singh *et al.* (2021).

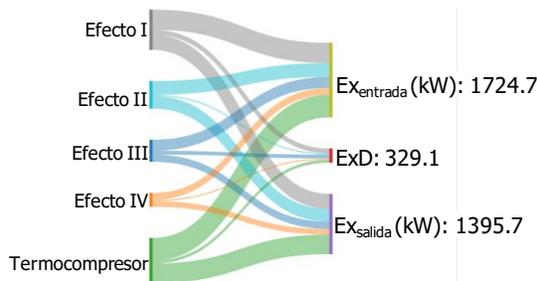


Fig. 2: Diagrama Grassman-Sankey de la distribución de exergía para el caso de estudio.

Tabla 4. Análisis exergético del caso de estudio.

Unidad del sistema	$Ex_{entrada}$ (kW)	Ex_{salida} (kW)	ExD (kW)
Efecto I	466.8	350.8	115.9
Efecto II	319	292.1	26.9
Efecto III	255.5	168.8	86.8
Efecto IV	160.4	130.2	30.3
Termocompresor	329.1	453.8	69.2

$Ex_{entrada}$, Ex_{salida} y ExD [=] kW

El efecto del C_p , como variable o constante, fue realizado para el caso de estudio sin termocompresión. La Figura 3 a) muestra este resultado en líneas continuas donde: a) el C_p variable presentó: ExD (387.72 kW) y el EE (3.984) y b) el C_p constante presentó: ExD (366.91 kW) y el EE (4.282). Esto demuestra el efecto de las propiedades sobre ExD con una diferencia del 5.67%. No obstante, los cálculos rigurosos deben seguir propiedades bajo propuestas variables con la temperatura y la composición.

El efecto del uso del termocompresor estuvo basado en el cambio del número del efecto que envía vapor al termocompresor, definido como N_T . Esto corresponde a una propuesta diversificada presentada en la Figura 1 b). Los resultados son presentados en la Figura 3 a). El aumento de ExD existe en N_T de mayor temperatura (efecto I) en un 2.8%, lo cual proviene de recibir mayor presión de reciclo en el termocompresor. Este cambio es similar para C_p variable y C_p constante. Una secuencia en contracorriente (líquido fluye IV-III-II-I) aumenta el valor de

ExD hasta un 28% con mayor efecto con N_T de menor temperatura (efecto IV). Esto es opuesto a los resultados del caso de estudio y proviene de entradas de mayor temperatura en N_T de menor temperatura. Esto coincide con otros análisis térmicos de evaporadores (Galván-Angeles *et al.*, 2015).

El cambio en el número de efectos es importante para establecer el costo de inversión en el evaporador (Maroulis & Saravacos, 2008), el esquema de la Figura 1 b) corresponde a esta propuesta. Esta sección del análisis consideró ocho efectos como máximo y no varió las temperaturas de operación del caso de estudio base: 45°C a 68°C. Esto requirió una distribución homogénea de la temperatura entre los efectos bajo la expresión lineal: $T_i = (68-45)^\circ C / (n-1)$. El resto de la información del caso base fue conservada y consideró C_p variable. La Figura 3 b) contiene los resultados de este análisis, donde el aumento en el número de efectos es proporcional a EE e inverso a ExD . Esto indica que el aumento del número de efectos es un beneficio térmico al reducir un 8% el valor de ExD por el aumento de un efecto en la secuencia; pero está sujeto al incremento en el costo fijo del sistema, como lo indicó Smith y Jones (1990) con la integración de energía. No obstante, un mínimo en la curva de ExD sugeriría un número de 3 o 4 efectos antes de tener una menor relación de cambio de ExD .

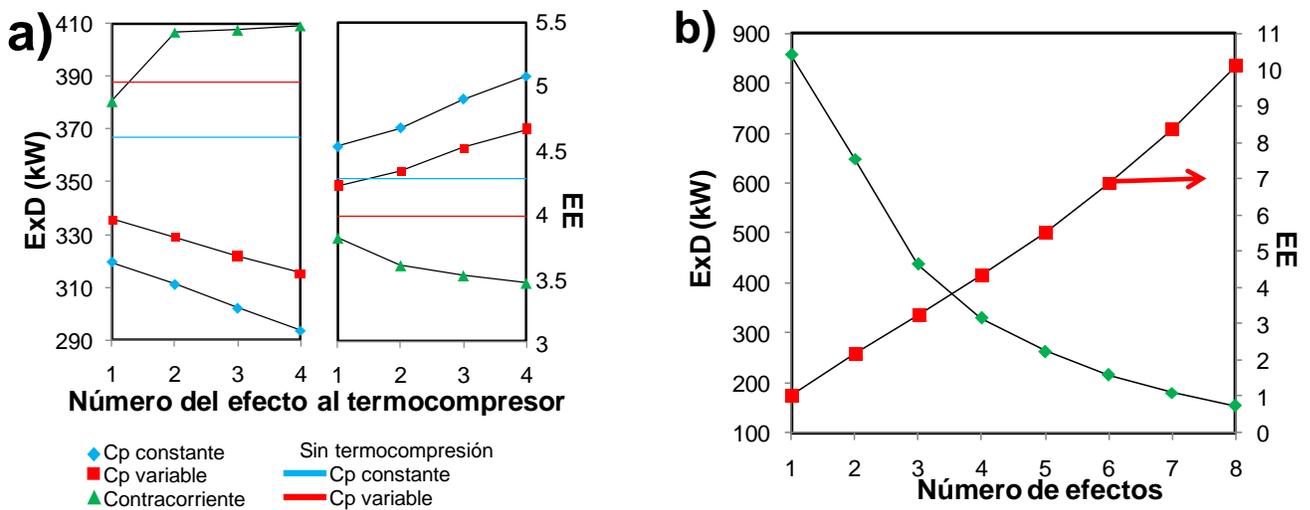


Fig. 3: Resultados de aplicar el análisis de exergía planteado sobre el caso propuesto: a) análisis para un sistema de cuatro efectos de evaporación (sin uso de termocompresión y con cambio de la ubicación del termocompresor), y b) análisis para un sistema con cambio del número de efectos.

CONCLUSIONES

El análisis de exergía es una herramienta aplicada en la industria alimentaria para comprender la eficiencia térmica de los procesos. Este trabajo presenta una aplicación del análisis de exergía a la evaporación de leche siguiendo una formulación matemática generalizada, donde el comportamiento exergético del termocompresor fue similar a los análisis térmicos presentados en la literatura. Los resultados indicaron que el valor de ExD es reducido: a) hasta un 6% por el cambio de C_p , como constante o variable, b) un 3% por mandar vapor al termocompresor desde efectos de menor temperatura, y c) 8% por el aumento de un efecto en la secuencia de evaporación. Estos valores son una guía en la toma de decisiones durante el diseño de evaporadores de alimentos, los cuales deben estar sujetos a un nivel alto de sustentabilidad y eficiencia térmica. Este análisis debe ser extendido para optimizar el diseño geométrico del sistema de evaporación y reducir el costo de operación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo brindado por CONAHCYT y PRODEP, México.

REFERENCIAS

- Balkan, F., Colak, N. & Hepbasli, A. (2005). Performance evaluation of a triple-effect evaporator with forward feed using exergy analysis. *International Journal of Energy Research*, 29(5), 455-470.
- Bapat, S.M., Majali, V.S. & Ravindranath, G. (2013). Exergetic evaluation and comparison of quintuple effect evaporation units in Indian sugar industries. *International Journal of Energy Research*, 37(12), 1415-1427.
- Bapat, S.M., Majali, V.S. & Ravindranath, G. (2016). Exergy and sustainability analysis of quintuple effect evaporation unit in a sugar industry - a case study. *International Journal of Renewable Energy Technology*, 7(1), 46-68.
- Briam, R., Walker, M.E. & Masanet, E. (2015). A comparison of product-based energy intensity metrics for cheese and whey processing. *Journal of Food Engineering*, 151, 25-33.
- Chen, T. & Ruan, Q. (2016). Modeling and energy reduction of multiple effect evaporator system with thermal vapor compression. *Computers & Chemical Engineering*, 92, 204-215.
- Choi, C.Y. & Okos, M.R. (1986). "Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods." En: *Food Engineering and Process Applications: Transport Phenomena*, Maguer, M. L. and Jelen, P., eds., Elsevier Applied Science Publishers, London.
- Díaz-Ovalle, C., Galván-Ángeles, E., Ramos-Ojeda, E. & Castillo-Borja, F. (2013). Metodología para el diseño óptimo de evaporadores de película descendente [An approach for optimal design in falling-film evaporators]. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 4(3), 49-61.
- Díaz-Ovalle, C.O., González-Alatorre, G. & Alvarado, J.F.J. (2017). Analysis of the dynamic response of falling-film evaporators considering fouling. *Food and Bioproducts Processing*, 104, 124-136.
- Díaz-Ovalle, C.O. & Jafari, S.M. (2023). Multiple-Effect Evaporators in the Food Industry: Fundamentals, Design, Simulation, Control, and Applications. *Food Engineering Reviews*. IN PRESS. <https://doi.org/10.1007/s12393-023-09350-6>
- Dincer, I. & Rosen, M.A. (2013). *Exergy*, Elsevier.
- Galván-Ángeles, E., Díaz-Ovalle, C.O., González-Alatorre, G., Castrejón-González, E.O. & Vázquez-Román, R. (2015). Effect of thermo-compression on the design and performance of falling-film multi-effect evaporator. *Food and Bioproducts Processing*, 96, 65-77.
- Gautami, G. & Khanam, S. (2012). Selection of optimum configuration for multiple effect evaporator system. *Desalination*, 288, 16-23.
- Higa, M., Freitas, A.J., Bannwart, A.C. & Zemp, R.J. (2009). Thermal integration of multiple effect evaporator in sugar plant. *Applied Thermal Engineering*, 29 (2-3), 515-522.
- Jyoti, G. & Khanam, S. (2014). Simulation of heat integrated multiple effect evaporator system. *International Journal of Thermal Sciences*, 76, 110-117.
- Khanam, S. & Mohanty, B. (2010). Energy reduction schemes for multiple effect evaporator. *Applied Energy*, 87(4), 1102-1111.
- Ladha-Sabur, A., Bakalis, S., Fryer, P.J. & Lopez-Quiroga, E. (2019). Mapping energy consumption in food manufacturing. *Trends in Food Science & Technology*, 86, 270-280.

- Lambert, R.N., Joye, D.D. & Koko, F.W. (1987). Design calculations for multiple-effect evaporators. 1. Linear method. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 26 (1), 100-104.
- Maroulis, Z.B. & Saravacos, G.D., (2008). *Food plant economics*, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL.
- Minton, P.E. (1986). *Handbook of evaporation technology*, Noyes Publications.
- Moejes, S.N. & van Boxtel, A.J.B. (2017). Energy saving potential of emerging technologies in milk powder production. *Trends in Food Science & Technology*, 60, 31-42.
- Mojarab Soufiyan, M., Dadak, A., Hosseini, S.S., Nasiri, F., Dowlati, M., Tahmasebi, M. et al. (2016). Comprehensive exergy analysis of a commercial tomato paste plant with a double-effect evaporator. *Energy*, 111, 910-922.
- Morison, K.R. & Hartel, R.W. (2019). "Evaporation and freeze concentration." En: *Handbook of food engineering*, Heldman, D. R., Lund, D. B., and Sabliov, C. M., eds., Taylor & Francis Group, Boca Raton.
- Nishitani, H. & Kunugita, E. (1979). The optimal flow pattern of mutieffect evaporator systems. *Computers & Chemical Engineering*, 3, 261-268.
- Saravacos, G. & Kostaropoulos, A.E. (2016). *Handbook of food processing equipment*, Springer.
- Sharma, S., Rangaiah, G.P. & Cheah, K.S. (2011). Multi-objective optimization using MS Excel with an application to design of a falling-film evaporator system. *Food and Bioproducts Processing*, 90 (2), 123-134.
- Singh, G., Chopra, K., Tyagi, V.V., Pandey, A.K., Ma, Z. & Ren, H. (2021). A comprehensive energy, exergy and enviroeconomic (3-E) analysis with carbon mitigation for multistage evaporation assisted milk powder production unit. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 43, 100925.
- Singh, R.P., Erdogdu, F. & Rahman, M.S. (2009). "Specific heat and enthalpy of foods" En: *Food properties handbook*, Rahman, M. S., ed., Taylor & Francis Group, Boca Raton, 517-544.
- Smith, R. & Jones, P.S. (1990). The optimal design of integrated evaporation systems. *Heat Recovery Systems & CHP*, 10 (4), 341-368.
- Sogut, Z., Ilten, N. & Oktay, Z. (2010). Energetic and exergetic performance evaluation of the quadruple-effect evaporator unit in tomato paste production. *Energy*, 35 (9), 3821-3826.
- Topic, R. (1995). Mathematical model for exergy alysis for drying pants. *Drying Technology*, 13 (1-2), 437-445.
- Zhang, Y., Munir, M.T., Udugama, I., Yu, W. & Young, B.R. (2018). Modelling of a milk powder falling film evaporator for predicting process trends and comparison of energy consumption. *Journal of Food Engineering*, 225, 26-33.
- Zisopoulos, F.K., Rossier-Miranda, F.J., van der Goot, A.J. & Boom, R.M. (2017). The use of exergetic indicators in the food industry – A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57 (1), 197-211.