

Artículo de investigación

<https://doi.org/10.47460/athenea.v7i25.147>

## Análisis de la economía de vapor en un sistema de evaporación de cinco efectos para la industria azucarera

Victor Alejandro Ascurra Valle  
<https://orcid.org/0000-0001-5755-5267>  
vascurra@uns.edu.pe  
Universidad Nacional del Santa  
Nuevo Chimbote, Perú

Saúl Marco Eusebio Lara  
<https://orcid.org/0000-0001-6875-240X>  
seusebio@uns.edu.pe  
Universidad Nacional del Santa  
Nuevo Chimbote, Perú

Percy Danilo Aguilar Rojas  
<https://orcid.org/0000-0001-9345-7955>  
paguilarr@unitru.edu.pe  
Universidad Nacional de Trujillo  
Trujillo, Perú

\*Autor de correspondencia: [vascurras@uns.edu.pe](mailto:vascurras@uns.edu.pe)

Recibido: (12/03/2026), Aceptado: (20/06/2026)

**Resumen.** La economía de vapor constituye uno de los principales indicadores del desempeño energético en sistemas de evaporación de múltiple efecto utilizados en la industria azucarera. El objetivo de este estudio fue analizar la economía de vapor de un sistema de evaporación de cinco efectos mediante un enfoque cuantitativo y un diseño cuasi experimental basado en datos operacionales reales. Se evaluó la influencia de los grados Brix y del flujo másico de jugo clarificado mediante un modelo de regresión lineal múltiple, cuya significancia fue verificada mediante análisis estadístico. Los resultados evidenciaron que el incremento del flujo másico favorece la economía de vapor, mientras que mayores concentraciones iniciales del jugo reducen su valor. El modelo obtenido presentó una elevada capacidad predictiva y permitió identificar condiciones operacionales que optimizan el aprovechamiento del vapor. Se concluye que el modelado matemático constituye una herramienta útil para mejorar la eficiencia energética y apoyar la toma de decisiones en la industria azucarera.

**Palabras clave:** economía de vapor, evaporación de múltiple efecto, industria azucarera, modelado matemático, eficiencia energética.

### Analysis of Steam Economy in a Five-Effect Evaporation System for the Sugar Industry

**Abstract.** Steam economy is one of the main indicators of energy performance in multiple-effect evaporation systems used in the sugar industry. The objective of this study was to analyze the steam economy of a five-effect evaporation system using a quantitative approach and a quasi-experimental design based on real operational data. The influence of Brix degrees and the mass flow rate of clarified juice was evaluated through a multiple linear regression model, whose significance was verified by statistical analysis. The results showed that an increase in mass flow rate improves steam economy, whereas higher initial juice concentrations reduce its value. The obtained model showed high predictive capacity and made it possible to identify operational conditions that optimize steam utilization. It is concluded that mathematical modeling constitutes a useful tool for improving energy efficiency and supporting decision-making in the sugar industry.

**Keywords:** steam economy, multiple-effect evaporation, sugar industry, mathematical modeling, energy efficiency.



## I. INTRODUCCIÓN

La industria azucarera depende de procesos térmicos de alta demanda energética, entre los cuales la evaporación constituye una de las operaciones unitarias más críticas para la concentración del jugo de caña. Los sistemas de evaporación de múltiple efecto han permitido mejorar la eficiencia del proceso mediante el aprovechamiento sucesivo del vapor entre los diferentes efectos, reduciendo el consumo energético y los costos de operación. Sin embargo, el incremento de las exigencias en materia de competitividad y sostenibilidad hace necesaria la optimización continua de la economía de vapor como indicador del desempeño energético del sistema [1], [2], [3], [4].

La economía de vapor expresa la relación entre la cantidad de agua evaporada y el vapor vivo consumido, por lo que su evaluación requiere integrar balances de masa y energía, transferencia de calor y propiedades termodinámicas del jugo de caña. En este sentido, el modelado matemático y la simulación computacional constituyen herramientas fundamentales para analizar el comportamiento de sistemas de evaporación de cinco efectos y determinar la influencia de las variables operacionales sobre su eficiencia térmica [5], [6], [7], [8], [9], [10].

Diversos estudios han demostrado que la optimización del diseño, la operación y el control de evaporadores de múltiple efecto permite reducir el consumo de vapor sin comprometer la calidad del proceso. Paralelamente, las investigaciones recientes destacan la importancia de considerar tanto las características fisicoquímicas del jugo como los criterios de sostenibilidad y evaluación tecnoeconómica para lograr procesos industriales más eficientes e integrales [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17].

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo analizar la economía de vapor de un sistema de evaporación de cinco efectos utilizado en la industria azucarera, integrando los fundamentos de las operaciones unitarias, el modelado matemático y los enfoques actuales de evaluación tecnoeconómica, con el propósito de aportar criterios que favorezcan la optimización energética de este tipo de sistemas [18], [19], [20].

## II. MARCO TEÓRICO

### A. Economía de vapor en sistemas de evaporación de múltiple efecto

La evaporación constituye una de las operaciones unitarias de mayor consumo energético dentro de la industria azucarera, debido a que concentra el jugo de caña mediante la eliminación controlada de agua empleando energía térmica suministrada en forma de vapor. Desde la perspectiva de la ingeniería de procesos, la eficiencia de esta operación se evalúa mediante la economía de vapor, indicador que expresa la relación entre la masa de agua evaporada y la masa de vapor vivo consumida durante el proceso. Cuanto mayor es este índice, mayor es el aprovechamiento energético del sistema y menor el requerimiento específico de vapor para alcanzar una determinada concentración del producto [1], [6], [7].

El principio de funcionamiento de los evaporadores de múltiple efecto consiste en reutilizar el vapor generado en un efecto como fuente de calentamiento del siguiente, aprovechando el calor latente de condensación y reduciendo progresivamente el consumo de vapor fresco. En condiciones ideales, la economía de vapor aumenta aproximadamente de manera proporcional al número de efectos, aunque en la práctica su desempeño depende de múltiples factores asociados a la transferencia de calor, las pérdidas energéticas y las condiciones reales de operación [7], [13], [15].

### B. Modelado matemático de sistemas de evaporación

El análisis del comportamiento de sistemas de evaporación requiere la integración de balances de materia y energía con modelos de transferencia de calor capaces de representar las interacciones entre las corrientes líquidas y de vapor. Estos modelos permiten estimar variables fundamentales como temperaturas de ebullición, presiones de operación, coeficientes globales de transferencia de calor, caudales de evaporación y concentración final del jugo, proporcionando una descripción cuantitativa del proceso [3], [6], [9].

Los avances en simulación computacional han permitido incorporar métodos numéricos para resolver sistemas de ecuaciones diferenciales y algebraicas que describen el comportamiento dinámico de

evaporadores de múltiple efecto. Estudios recientes han empleado técnicas de simulación, control automático y herramientas computacionales para reproducir escenarios operacionales complejos, evaluar estrategias de optimización y predecir el desempeño energético bajo diferentes condiciones de operación [1], [4], [5], [11], [12], [14].

#### *C. Variables que influyen en la economía de vapor*

La economía de vapor depende simultáneamente de variables termodinámicas, hidráulicas y operacionales. Entre las más relevantes destacan la concentración inicial del jugo, expresada mediante los grados Brix, el flujo másico de alimentación, la distribución de temperaturas entre los efectos, la presión de operación y los coeficientes globales de transferencia de calor. Estas variables modifican tanto la cantidad de agua evaporada como el consumo de vapor requerido para mantener el proceso de concentración [3], [5], [9], [13].

Asimismo, el diseño de los evaporadores influye directamente sobre la eficiencia del sistema. Aspectos como el tipo de evaporador, el área efectiva de transferencia de calor, la configuración hidráulica y el estado de incrustación de las superficies calefactoras determinan el rendimiento térmico alcanzable. En consecuencia, la optimización de estos parámetros constituye una estrategia fundamental para incrementar la economía de vapor y reducir los costos energéticos de la producción azucarera [2], [7], [10], [15].

#### *D. Evaluación tecnoeconómica de procesos industriales*

En los últimos años, la optimización de procesos ha evolucionado desde enfoques exclusivamente termodinámicos hacia metodologías que integran indicadores técnicos, económicos y ambientales. Bajo esta perspectiva, el desempeño energético deja de evaluarse únicamente mediante balances de masa y energía para incorporar criterios relacionados con costos operacionales, eficiencia global del proceso, sostenibilidad y utilización racional de los recursos [18], [19], [20].

Este enfoque resulta particularmente pertinente para los sistemas de evaporación utilizados en la industria azucarera, donde pequeñas mejoras en la economía de vapor pueden representar reducciones significativas en el consumo de combustible, el costo de producción y las emisiones asociadas a la generación de energía térmica. En consecuencia, el análisis conjunto de variables operacionales y criterios tecnoeconómicos proporciona una base sólida para identificar condiciones de operación que permitan maximizar el aprovechamiento energético del sistema y fortalecer la competitividad industrial [13], [18], [19], [20].

### **III. METODOLOGÍA**

#### *A. Diseño de la investigación*

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, de alcance explicativo y diseño cuasi experimental, orientado al análisis del comportamiento operativo de un sistema de evaporación de cinco efectos utilizado en la industria azucarera. El estudio se fundamentó en la evaluación de variables de proceso registradas durante la operación industrial y en la construcción de un modelo matemático capaz de describir la relación existente entre la economía de vapor y las principales variables operacionales del sistema. El carácter cuasi experimental se justifica debido a que las variables fueron analizadas bajo condiciones reales de operación industrial, sin manipulación directa de los equipos ni alteración de las condiciones normales del proceso.

#### *B. Unidad de estudio*

La unidad de estudio correspondió a un sistema industrial de evaporación de cinco efectos tipo Robert dispuesto en serie para la concentración de jugo clarificado de caña de azúcar. El sistema opera mediante alimentación hacia adelante, donde el vapor vivo suministra energía al primer efecto y el vapor generado en cada etapa es reutilizado como medio de calentamiento del efecto siguiente, permitiendo incrementar la eficiencia térmica del proceso mediante el aprovechamiento sucesivo del calor latente de condensación.

### C. Variables analizadas

La variable dependiente fue la economía de vapor (EV), definida como la relación entre la masa total de agua evaporada y la masa de vapor vivo consumida durante el proceso:

$$EV = \frac{m_{ev}}{m_v} \quad (1)$$

donde  $m_{ev}$  representa la masa total de agua evaporada (t/h) y  $m_v$  corresponde al consumo de vapor vivo (t/h).

Como variables independientes se consideraron la concentración del jugo de alimentación, expresada en grados Brix ( $^{\circ}$ Brix), y el flujo másico de jugo clarificado (t/h). Estas variables fueron seleccionadas por representar parámetros operacionales con influencia directa sobre el desempeño térmico del sistema de evaporación.

### D. Recolección y procesamiento de datos

Los datos experimentales fueron obtenidos a partir de los registros operacionales del sistema industrial de evaporación, considerando diferentes combinaciones de concentración del jugo y caudal de alimentación dentro del rango normal de funcionamiento de la planta.

Para cada condición de operación se registraron la concentración del jugo ( $^{\circ}$ Brix), el flujo másico de jugo claro (t/h), la masa total de agua evaporada (t/h) y el consumo de vapor (t/h). Posteriormente, la economía de vapor fue calculada para cada condición experimental mediante la relación entre la masa evaporada y el vapor consumido.

### E. Modelado matemático

El comportamiento del sistema fue representado mediante un modelo de regresión lineal múltiple obtenido por el método de mínimos cuadrados ordinarios, estableciendo como variable respuesta la economía de vapor y como variables predictoras los grados Brix y el flujo másico del jugo de alimentación.

La expresión general del modelo adoptó la forma:

$$EV = \beta_0 + \beta_1 B + \beta_2 M + \varepsilon \quad (2)$$

donde  $EV$  representa la economía de vapor;  $B$  corresponde a la concentración del jugo ( $^{\circ}$ Brix);  $M$  representa la masa de jugo alimentada (t/h);  $\beta_i$  son los coeficientes del modelo; y  $\varepsilon$  corresponde al término aleatorio.

### F. Validación del modelo

La capacidad predictiva del modelo fue evaluada mediante indicadores estadísticos ampliamente utilizados en análisis de regresión. Se analizaron el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el coeficiente de determinación ajustado, el análisis de varianza (ANOVA), la prueba de significancia individual de los coeficientes mediante estadísticos  $t$ , los valores de probabilidad ( $p < 0,05$ ) y el análisis gráfico de residuos para verificar los supuestos de linealidad, homocedasticidad e independencia. La aceptación del modelo estuvo condicionada a la obtención de parámetros estadísticamente significativos y a la ausencia de patrones sistemáticos en los residuos.

### G. Análisis de optimización

Finalmente, el modelo matemático obtenido fue empleado para analizar el comportamiento de la economía de vapor dentro del dominio experimental evaluado. Mediante superficies de respuesta y curvas de nivel se identificó la influencia simultánea de los grados Brix y del flujo másico del jugo sobre la eficiencia energética del sistema, permitiendo establecer las condiciones operacionales asociadas al mayor aprovechamiento del vapor y, por consiguiente, a una operación más eficiente del proceso de evaporación.

## IV. RESULTADOS

### A. Comportamiento operacional del sistema de evaporación

El sistema evaluado corresponde a una estación de evaporación de cinco efectos tipo Robert conectados en serie mediante alimentación hacia adelante, donde el vapor generado en cada efecto es reutilizado como fuente térmica del efecto siguiente. Esta configuración permite incrementar el aprovechamiento energético del proceso y constituye el fundamento físico de la economía de vapor analizada en este estudio.

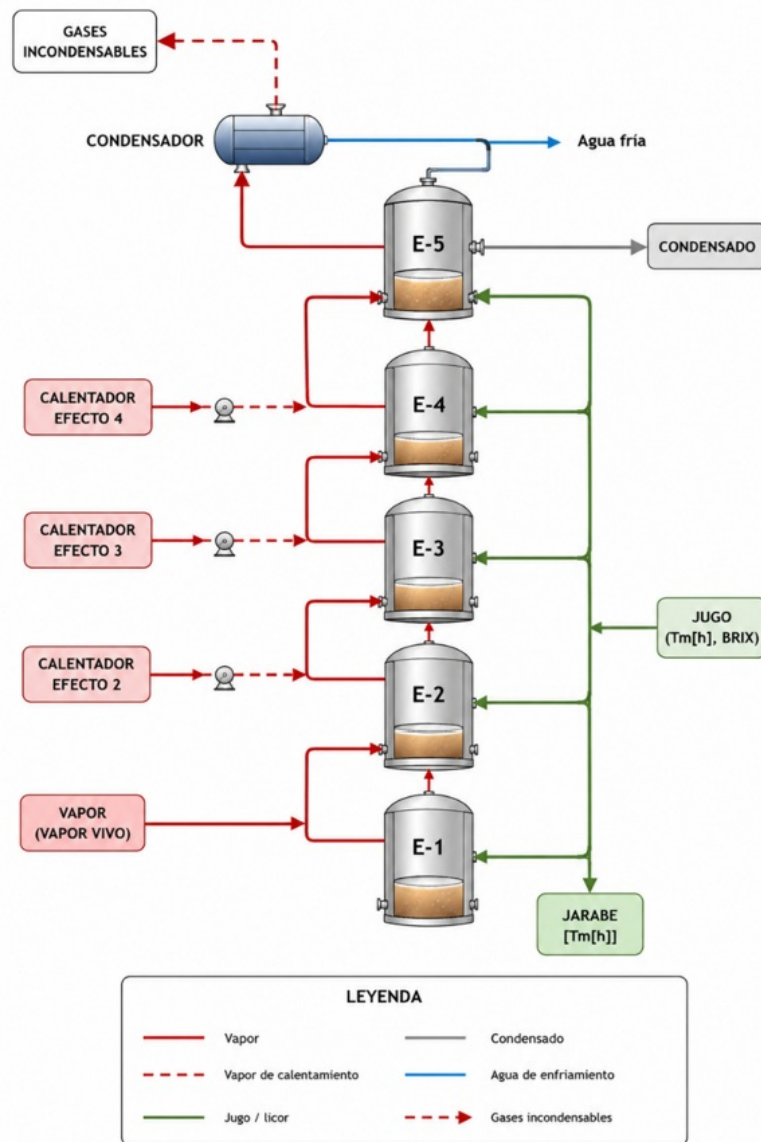


Fig. 1. Sistema de evaporación de cinco efectos.

Los datos experimentales fueron obtenidos para diferentes combinaciones del flujo másico de jugo clarificado y concentración inicial del producto. El rango experimental comprendió concentraciones entre 12 y 15 °Brix y caudales de alimentación entre 465 y 495 t/h, condiciones representativas de la operación industrial normal del sistema.

**Tabla 1.** Datos experimentales del sistema de evaporación.

Brix	Jugo claro $m_0$ (t/h)	Masa evaporada total (t/h)	Consumo de vapor (t/h)
12	465	379,1538	218,0008
12	475	387,3077	219,6316
12	485	395,4615	221,2624
12	495	403,6154	222,8931
13	465	372,0000	216,5701
13	475	380,0000	218,1701
13	485	388,0000	219,7701
13	495	396,0000	221,3701
14	465	364,8462	215,1393
14	475	372,6923	216,7085
14	485	380,5385	218,2778
14	495	388,3846	219,8470
15	465	357,6923	213,7085
15	475	365,3846	215,2470
15	485	373,0769	216,7854
15	495	380,7692	218,3239

Los resultados muestran que el incremento del flujo másico de alimentación favorece el aumento de la cantidad total de agua evaporada, mientras que mayores concentraciones iniciales del jugo reducen la masa de agua susceptible de evaporación. Este comportamiento coincide con los principios establecidos para sistemas de evaporación múltiple, donde la carga térmica depende directamente de la composición del alimento y del caudal procesado.

*B. Evaluación de la economía de vapor*

A partir de los datos experimentales se calculó la economía de vapor para cada condición operacional mediante la relación entre la masa de agua evaporada y el consumo de vapor vivo.

**Tabla 2.** Economía de vapor calculada.

Brix (°Bx)	465 t/h	475 t/h	485 t/h	495 t/h
12	1,74	1,76	1,79	1,81
13	1,72	1,74	1,77	1,79
14	1,70	1,72	1,74	1,77
15	1,67	1,70	1,72	1,74

Se observó que la economía de vapor presentó valores comprendidos entre 1,67 y 1,81, evidenciando una mejora progresiva conforme aumenta el flujo de alimentación. En contraste, incrementos en la concentración inicial del jugo provocaron una ligera disminución del indicador, atribuible al aumento de la viscosidad y de la elevación del punto de ebullición, fenómenos que reducen la eficiencia de transferencia de calor. Los resultados confirman que la economía de vapor constituye un indicador sensible frente a pequeñas variaciones de las condiciones operacionales y puede emplearse como criterio para evaluar el desempeño energético del sistema.

*C. Modelado estadístico del proceso*

Con el propósito de cuantificar la influencia simultánea de las variables operacionales sobre la economía de vapor, se ajustó un modelo de regresión lineal múltiple utilizando los grados Brix y el flujo másico de alimentación como variables independientes.

**Tabla 3.** Parámetros del modelo de regresión.

Parámetro	Estimación	Error estándar	Estadístico <i>t</i>	Valor <i>p</i>
Constante	0,91825	0,0352668	26,0372	0,0000
Brix	-0,0225	0,000707107	-31,8198	0,0000
Masa_jugo	0,00235	0,0000707107	33,234	0,0000

El modelo obtenido presentó un coeficiente de determinación superior al 99%, indicando una elevada capacidad para explicar la variabilidad observada de la economía de vapor. Asimismo, todos los coeficientes estimados resultaron estadísticamente significativos ( $p < 0,05$ ), demostrando que ambas variables contribuyen de manera importante al comportamiento del sistema. El signo negativo asociado a los grados Brix confirma que el incremento en la concentración inicial del jugo disminuye la economía de vapor, mientras que el coeficiente positivo del flujo másico evidencia una mejora del aprovechamiento energético cuando aumenta la carga de alimentación.

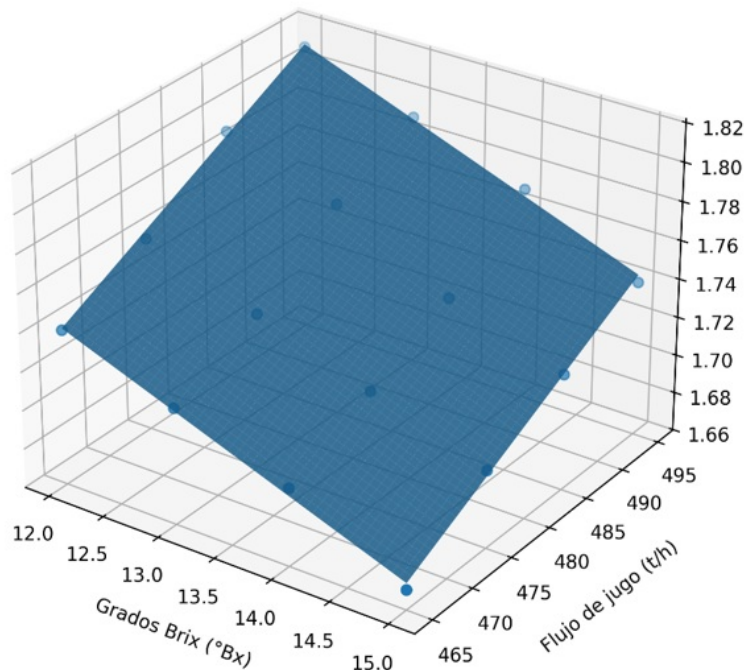
*D. Validación estadística del modelo*

La significancia global del modelo fue evaluada mediante análisis de varianza.

**Tabla 4.** ANOVA del modelo de regresión.

Fuente	Suma de cuadrados	gl	Cuadrado medio	Razón F	Valor <i>p</i>
Modelo	0,02117	2	0,010585	1058,50	0,0000
Residual	0,00013	13	0,00001	–	–
Total corregido	0,0213	15	–	–	–

El elevado valor del estadístico F y el nivel de significancia obtenido permitieron rechazar la hipótesis nula, confirmando que el modelo explica de manera significativa la variación observada de la economía de vapor. Para complementar esta validación se recomienda incorporar el gráfico de residuos estudentizados frente a los valores predichos.



**Fig. 2.** Superficie de respuesta de la economía de vapor en función de los grados Brix y el flujo másico de jugo. Los puntos representan los datos experimentales utilizados para el ajuste del modelo de regresión.

La ausencia de patrones sistemáticos en los residuos confirmaría el cumplimiento de los supuestos de linealidad y homocedasticidad requeridos por el modelo de regresión.

#### E. Optimización de las condiciones de operación

Una vez validado el modelo estadístico, se analizó el comportamiento de la economía de vapor mediante una superficie de respuesta generada a partir del modelo de regresión. La superficie evidencia que la economía de vapor aumenta conforme se incrementa el flujo másico del jugo y disminuye la concentración inicial del mismo. En consecuencia, la combinación de mayores caudales de alimentación con menores grados Brix favorece un mejor aprovechamiento del vapor disponible, reduciendo el consumo específico de energía (Figura 2).

Como complemento del análisis tridimensional, el mapa de contornos facilita la identificación de regiones operacionales con niveles similares de economía de vapor, permitiendo visualizar de forma más precisa las zonas de mayor eficiencia energética del proceso.

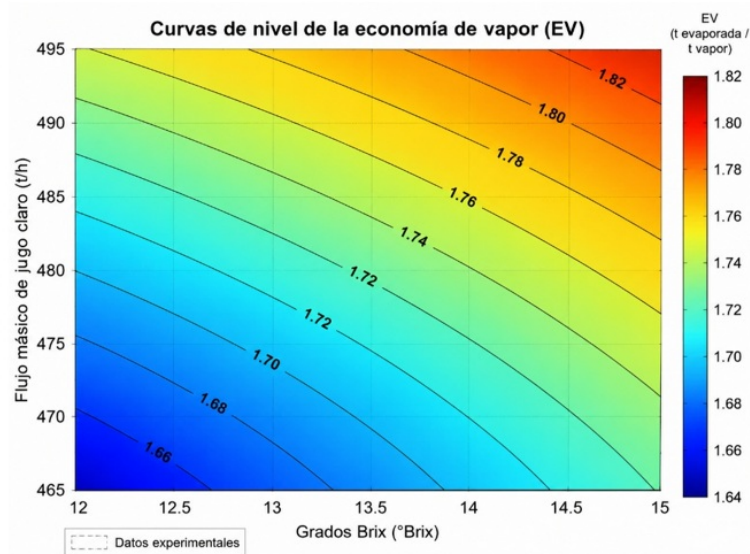


Fig. 3. Curvas de nivel de la economía de vapor.

Las curvas de nivel muestran una distribución prácticamente lineal de la economía de vapor dentro del dominio experimental evaluado. Se observa que los valores más elevados se concentran en la región correspondiente a mayores caudales de alimentación ( $\approx 495$  t/h) y menores concentraciones iniciales del jugo ( $\approx 12$  °Brix), donde la economía de vapor alcanza valores cercanos a 1,81. Por el contrario, la combinación de menores caudales ( $\approx 465$  t/h) y mayores concentraciones ( $\approx 15$  °Brix) presenta los valores mínimos del indicador ( $\approx 1,67$ ). Esta representación gráfica facilita la selección de condiciones operativas orientadas a maximizar la eficiencia energética del sistema sin incrementar el consumo de vapor.

#### F. Discusión

Los resultados obtenidos confirman que la economía de vapor en un sistema de evaporación de cinco efectos depende directamente de las condiciones de operación, particularmente del flujo másico del jugo y de su concentración inicial. Se observó que el incremento del caudal de alimentación favorece un mayor aprovechamiento del vapor disponible, mientras que el aumento de los grados Brix reduce progresivamente la economía de vapor. Este comportamiento puede explicarse por el incremento de la viscosidad del jugo y por la elevación del punto de ebullición a mayores concentraciones, fenómenos que disminuyen la eficiencia de la transferencia de calor y aumentan el requerimiento energético del proceso, en concordancia con los principios de las operaciones unitarias descritos por Geankoplis [6] y McCabe et al. [7].

Estos resultados coinciden con los estudios desarrollados sobre evaporadores de múltiple efecto aplicados a la industria azucarera. Ordoñez et al. [9] demostraron que la adecuada distribución de

las cargas térmicas entre los efectos constituye un factor determinante para mejorar el desempeño energético del sistema, mientras que Tibaquirá et al. [13] evidenciaron que pequeñas variaciones en las condiciones de operación pueden generar cambios significativos en la economía de vapor durante la producción de azúcar. De forma similar, los modelos de simulación desarrollados por Avalo y Varela [1], Franco [4] y Garro [5] resaltan la utilidad del modelado matemático como herramienta para predecir el comportamiento de los sistemas de evaporación y evaluar alternativas de operación antes de su implementación industrial.

El modelo de regresión obtenido presentó una elevada capacidad predictiva, lo que demuestra que las variables seleccionadas describen adecuadamente el comportamiento de la economía de vapor dentro del dominio experimental analizado. Aunque el modelo lineal constituye una aproximación simplificada del fenómeno físico, sus resultados ofrecen una herramienta práctica para apoyar la toma de decisiones operacionales y la optimización preliminar del proceso. Este enfoque resulta consistente con los trabajos de Pérez et al. [11] y Simón [12], quienes destacan que los modelos matemáticos representan una alternativa eficiente para analizar el desempeño de estaciones de evaporación sin necesidad de intervenir directamente sobre el proceso industrial.

Desde una perspectiva aplicada, la incorporación de criterios tecnoeconómicos amplía el alcance del análisis tradicional basado únicamente en balances de masa y energía. Estudios recientes señalan que la optimización de procesos debe considerar simultáneamente el consumo energético, los costos de operación y la sostenibilidad del sistema para garantizar una mayor competitividad industrial [18], [19], [20]. En este contexto, el presente estudio aporta una metodología sencilla y reproducible para evaluar la economía de vapor de sistemas de evaporación de cinco efectos, proporcionando una base técnica que puede contribuir a la mejora del desempeño energético y a la optimización de procesos en la industria azucarera.

## CONCLUSIONES

El análisis del sistema de evaporación de cinco efectos permitió comprobar que la economía de vapor constituye un indicador confiable para evaluar el desempeño energético del proceso de concentración del jugo de caña. Los resultados evidenciaron que este parámetro responde de manera significativa a las condiciones de operación, permitiendo identificar tendencias que favorecen una utilización más eficiente del vapor disponible.

Se determinó que el incremento del flujo másico de alimentación favorece el aumento de la economía de vapor, mientras que mayores concentraciones iniciales del jugo, expresadas en grados Brix, producen una disminución de este indicador debido al incremento de las exigencias térmicas del proceso. Esta relación confirma la importancia de controlar simultáneamente ambas variables para mejorar la eficiencia operativa del sistema.

El modelo matemático desarrollado presentó una adecuada capacidad para describir el comportamiento de la economía de vapor dentro del dominio experimental evaluado, constituyéndose en una herramienta útil para el análisis y la predicción del desempeño energético de sistemas de evaporación de múltiple efecto sin necesidad de realizar modificaciones sobre la operación industrial.

La integración del modelado matemático con criterios de evaluación tecnoeconómica proporciona un enfoque aplicable para apoyar la optimización de procesos en la industria azucarera. En este sentido, la metodología propuesta puede contribuir a la toma de decisiones orientadas a reducir el consumo específico de vapor, mejorar la eficiencia energética e incrementar la competitividad de los sistemas de evaporación de cinco efectos.

## REFERENCIAS

- [1] B. Avalo and A. Varela, "Modeling and simulation of a triple effect evaporator for the concentration of natural juices," *Revista Técnica de Ingeniería Universidad del Zulia*, vol. 31, no. 2, 2008.
- [2] Den Hollander Engineering, "Evaporation techniques: Total cost of ownership should be considered when installing evaporators," *Dairy Industries International*, vol. 81, no. 4, p. 40, 2016.
- [3] C. Díaz-Ovalle, E. Galván-Ángeles, E. Ramos-Ojeda, and F. Castillo-Borja, "Metodología para el diseño óptimo de evaporadores de película descendente," *Avances en Ciencias e Ingeniería*, vol. 4, no. 3, pp. 49–61, 2013.

- [4] J. Franco, *Diseño de un simulador por computadora de procesos de evaporación en una línea de evaporadores de múltiple efecto*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, 2006.
- [5] S. Garro, *Desarrollo de un simulador con Microsoft Excel para el diseño y evaluación de evaporadores de múltiple efecto en la industria azucarera*. Huacho, Perú: Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, 2019.
- [6] C. J. Geankoplis, *Procesos de transporte y principios de procesos de separación: Incluye operaciones unitarias*. México: Compañía Editorial Continental, 2006.
- [7] W. L. McCabe, J. C. Smith, and P. Harriott, *Operaciones unitarias en ingeniería química*, 7th ed. México: McGraw-Hill Interamericana, 2007.
- [8] J. Moreyra, "Observatorio de commodities. azúcar. boletín trimestral n.º 02-2022," Dirección General de Políticas Agrarias, Tech. Rep., 2022.
- [9] R. Ordoñez, C. Hernández, and L. Pedraza, "Modelado de un sistema de evaporación de múltiple efecto para la producción de panela (Azúcar no centrifugado)," *Información Tecnológica*, vol. 23, no. 6, pp. 105–120, 2012.
- [10] A. Panana, *Diseño de evaporadores de múltiple efecto conectados en serie*. Callao, Perú: Universidad Nacional del Callao, 2013.
- [11] L. Pérez, M. Rodríguez, and F. Fernández, "Modelación matemática y simulación del control automático para el quíntuple efecto de evaporación del central azucarero "El Palmar" en Venezuela," *Revista Centro Azúcar*, vol. 42, 2015.
- [12] E. Simón, "Modelado y simulación dinámica en ecosimpro de una estación de evaporación de la industria azucarera," in *1ª Reunión de Usuarios de EcosimPro*, Madrid, España, May 2001.
- [13] J. Tibaquirá, J. Carmona, D. Piarpuzán, and Á. Restrepo, "Economía de vapor en el proceso de elaboración de azúcar del ingenio risaralda," *Ingeniería y Competitividad*, 2021.
- [14] W. Villarreal and O. Rubio, "Simulación computacional de la entrada de jugo de caña de azúcar a un evaporador roberts," *Revista Ciencia y Tecnología, Universidad Nacional de Trujillo*, 2012.
- [15] Z. Z. Zavargo, A. I. Jokić, B. B. Prodanić, J. P. Grbić, and R. Jeftić-Mučbabić, "Performance of falling film plate evaporators in reconstructed multiple-effect evaporation station in sugar factory," *Thermal Science*, vol. 10, no. 4, pp. 55–61, 2006.
- [16] P. Dhansu *et al.*, "Different treatments for sugarcane juice preservation," *Foods*, vol. 12, no. 2, p. 311, 2023.
- [17] L. Wang, J. Wu, H. Huang, W. Huang, P. Wang, and J. Chen, "Coloration mechanisms of fresh sugarcane juice: Investigating the critical components and enzyme activity," *Journal of Food Science*, vol. 87, no. 4, pp. 1552–1562, 2022.
- [18] J. Wimble, R. Ashizawa, and E. W. Swartz, "Analysis of the economic viability and environmental impacts of a conceptual process model for the recovery of lactic acid from spent media in cultivated meat production," *Biotechnology Progress*, vol. 42, no. 2, p. e70094, 2026.
- [19] R. P. B. Ashok, R. Bergman, M. S. Hossain, D. Kumar, P. Nepal, and T. Runge, "Cellulose nanocrystals from forest residues: An integrated techno-economic analysis and life cycle assessment," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 227, p. 108778, 2026.
- [20] C. R. Chilakamarry, I. A. Khilji, and J. Satyavolu, "Techno-economic analysis for process design," in *Microbial Cell Factories in Food Waste Biorefinery*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2026, pp. 397–420.