Documento Técnico

IIAR 2026 Natural Refrigeration Conference
& Heavy Equipment Expo

15-18 de marzo del 2026
San Antonio, Texas

RECONOCIMIENTOS

El éxito de la Conferencia Anual del IIAR se debe a la calidad de los documentos técnicos en este volumen y al trabajo de sus autores. El IIAR expresa su profundo agradecimiento a los autores, revisores y editores por sus contribuciones a la industria de la refrigeración con refrigerantes naturales.

SOBRE ESTE VOLUMEN

Los documentos técnicos del IIAR están sujetos a una rigurosa revisión técnica por expertos en la industria. Las opiniones y puntos de vista expresadas en los artículos de este volumen son estrictamente las de los autores; mas no las del IIAR. Dichas opiniones no son parte de la política oficial del Instituto, y no están respaldadas oficialmente.

International Institute of Ammonia Refrigeration
1001 North Fairfax Street, Suite 503
Alexandria, VA 22314

703-312-4200 • info@iiar.org • www.iiar.org

©2026 IIAR

Documento Técnico

Bomba de calor de R-744 con eyectores: indicadores clave de desempeño y estrategias de control

Alessandro Silva, Oliver Javerschek, Andres Hegglin,
Lukas Patryarcha, Shahriar Amini, Mustafa Erguvan

Resumen

Este estudio investiga experimentalmente el uso de eyectores en sistemas transcríticos de bomba de calor de R-744 agua-agua, con enfoque en estrategias de control con eyectores ajustables para mejorar la eficiencia energética y la estabilidad operativa. Aunque los sistemas de R-744 ofrecen beneficios ambientales y termodinámicos, a menudo presentan dificultades para mantener un rendimiento óptimo en condiciones reales caracterizadas por fluctuaciones de temperatura ambiente y perfiles de carga variables. La investigación se llevó a cabo en una bomba de calor de R-744 agua-agua instalada en la Academia SCHAUFLER en Alemania, equipada con un compresor semihermético alternativo y tecnología de eyector ajustable. El rendimiento se evaluó bajo diversas condiciones de operación. Los indicadores clave de desempeño (KPIs) incluyeron el coeficiente de desempeño en calefacción (COP_h), la elevación de presión, la capacidad de calefacción, la presión del lado de alta, la temperatura de salida del gas cooler y la relación de apertura del eyector. Los resultados demostraron una mayor adaptabilidad y control cuando se aplicaron eyectores de geometría variable, con elevaciones de presión de 2,2 bar (31,9 psi) a 5,0 bar (72,5 psi) y capacidades de calefacción de 28,6 kW (97,6 kBTU/h) a 39,1 kW (133,4 kBTU/h). En condiciones de baja elevación de presión, el COP_h varió entre 3,91 y 5,44. El estudio también evaluó estrategias de control avanzadas, como la regulación del pinch-point y algoritmos adaptativos, que mejoraron la estabilidad de presión y la eficacia del intercambiador de calor.

© IIAR 2026

Introducción

La descarbonización de la calefacción y la refrigeración en sectores como la manufactura, los edificios comerciales, los supermercados, las plantas de procesamiento de alimentos, las instalaciones de almacenamiento en frío y las redes de calefacción distrital, entre otras aplicaciones, es esencial para alcanzar los objetivos climáticos globales. Los sistemas de bomba de calor por compresión de vapor desempeñan resultan fundamentales en este proceso debido a su alta eficiencia energética, especialmente cuando se alimentan con electricidad proveniente de fuentes renovables. Al convertir energía térmica de bajo grado en calor útil con emisiones mínimas, estos sistemas representan uno de los medios más eficaces para reducir la dependencia de los combustibles fósiles (de Boer et al., 2020; National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2021). A medida que se intensifican los esfuerzos de descarbonización y se endurecen las normas de eficiencia, la adopción de refrigerantes naturales como el R-744 en los sistemas de refrigeración, aire acondicionado y bombas de calor se ha acelerado (ATMOsphere, 2025). El R-744 destaca por su potencial de calentamiento global insignificante (PCG = 1) y su potencial de agotamiento de ozono nulo (PAO = 0), lo que lo convierte en una alternativa más ecológica frente a los refrigerantes sintéticos. Además, sus propiedades termofísicas permiten alcanzar altas temperaturas de salida, ideales para aplicaciones de bomba de calor.

A pesar de estas ventajas, los sistemas transcríticos con R-744 siguen estando limitados por pérdidas significativas asociadas al proceso de expansión (Elbel, 2011). La gran diferencia de presión entre el *gas cooler* y el evaporador provoca una considerable destrucción de exergía, lo que reduce la eficiencia global del ciclo. Para mitigar estos efectos, se han propuesto varias estrategias de mejora, como los eyectores bifásicos, los tubos de vórtice, los expansores, el subenfriamiento mecánico, el *flash gas bypass* (FGB), la compresión paralela, la compresión en dos etapas y el preenfriamiento evaporativo. Entre estas alternativas, la integración de eyectores ha recibido especial atención.

© IIAR 2026

Elbel y Hrnjak (2008) fueron pioneros en la aplicación de eyectores bifásicos en ciclos transcríticos con R-744, y reportaron mejoras del COP de aproximadamente un 7 %. También introdujeron un eyector de geometría variable equipado con un mecanismo de aguja que ajusta dinámicamente el diámetro de garganta para adaptarse a una amplia gama de condiciones de operación. Desde entonces, numerosos estudios han perfeccionado el diseño y el control de eyectores en diversas aplicaciones, incluyendo sistemas de refrigeración industrial, bombas de calor, sistemas de refrigeración de supermercados, procesamiento de productos lácteos, *chillers* marinos y sistemas de aire acondicionado residencial y automotriz. En todas estas aplicaciones, los eyectores han demostrado de manera consistente una mayor eficiencia y flexibilidad operativa en comparación con los dispositivos de expansión convencionales.

Las estrategias de control eficaces son fundamentales para optimizar el rendimiento del eyector bajo condiciones fuera del punto de diseño. Por ejemplo, Xu et al. (2012) utilizaron una boquilla con motor paso a paso para ajustar el área de la garganta en función de las condiciones de salida del *gas cooler*, aumentando el COP a pesar de una baja eficiencia del eyector. Liu et al. (2023) encontraron que la optimización de la presión de descarga en sistemas de dos etapas mejoró la eficiencia en un 5,7 %. Lawrence y Elbel (2019) demostraron que un control inadecuado puede provocar pérdidas de rendimiento significativas, lo que subraya la importancia de la regulación dinámica. Gullo et al. (2021) aplicaron un control por modulación de ancho de pulso (PWM) en pequeños sistemas con R-744, y mejoraron el COP en más del 5 % respecto a los eyectores pasivos y en más del 10 % frente a los sistemas base.

Ding et al. (2024) desarrollaron un modelo de flujo en no equilibrio que destacó la necesidad de un control preciso de la presión y temperatura de entrada, alcanzando una eficiencia del eyector de hasta el 31 % y reduciendo la destrucción de exergía del 48,3 % al 10,2 %. Zhu y Elbel (2020) propusieron un método de control basado en vórtices que regula la presión del lado de alta mediante el flujo en espiral de entrada, lo que permite aumentar la capacidad en un 11 % y mejorar el COP en un 8,1 % sin modificar la geometría del eyector.

Estudios de modelado y revisiones complementarias han ampliado la comprensión del diseño y control de eyectores. Sisti et al. (2023) desarrollaron un modelo dinámico de un *chiller* con R-744 transcrítico, que validaron mediante un control híbrido proporcional–integral–derivativo (PID) y basado en reglas, con un rango de carga parcial del 15 al 100 %. Gullo et al. (2020) revisaron los métodos de control de capacidad para eyectores bifásicos y concluyeron que las aplicaciones de mediana y gran escala están maduras, pero que los sistemas pequeños aún presentan desafíos. Barta et al. (2021) crearon y validaron una herramienta de diseño capaz de generar geometrías internas a partir de objetivos de rendimiento y de predecir con precisión las tendencias de eficiencia, lo que permite optimizar el diseño.

Este estudio investiga experimentalmente las estrategias de control de eyectores de boquilla variable bajo condiciones de operación dinámicas en una bomba de calor agua-agua con R-744 transcrítico. Al vincular datos experimentales con modelos analíticos, se demuestra cómo los eyectores de geometría variable pueden superar las limitaciones de los métodos convencionales y favorecer su implementación a gran escala.

A pesar de los avances, las evaluaciones sistemáticas de métodos de control avanzados en sistemas transcríticos de R-744 agua-agua siguen siendo escasas. Estos sistemas enfrentan desafíos particulares, como perfiles de carga dinámicos y operación fuera del punto de diseño, que rara vez se abordan en estudios previos. Este trabajo contribuye a llenar esa brecha mediante ensayos detallados realizados en la Academia SCHAUFLER. El sistema está diseñado para aplicaciones de baja elevación de presión y puede operar en modo asistido por eyector o en modo FGB. Aunque la comparación experimental directa con sistemas FGB queda fuera del alcance de este estudio, se reconoce como una línea de investigación valiosa para trabajos futuros.

© IIAR 2026

Métodos

Configuración del sistema

Para realizar esta evaluación, el sistema experimental de bomba de calor con R-744 de la Academia SCHAUFLER fue configurado e instrumentado para la medición detallada de los KPIs del eyector y las estrategias de control, lo que amplía investigaciones previas mediante una validación experimental exhaustiva. La bomba de calor agua-agua está equipada con un compresor semihermético 4MTEU-10LK, con un desplazamiento de 6,5 m³/h (3,83 CFM) a 50 Hz (1500 rpm). El compresor es accionado por un motor de imanes permanentes de arranque directo (LSPM) y controlado mediante un variador de frecuencia, con un rango de operación de 25 y 70 Hz. El sistema de manejo de aceite incluye un separador de aceite, un reservorio de aceite de baja presión y un controlador del nivel de aceite. El lubricante utilizado es aceite de polialquilenglicol (PAG), con una viscosidad cinemática de 68 mm²/s (316 SUS) a 40°C (104°F).

Los componentes adicionales incluyen intercambiadores de calor de placas que funcionan como evaporador y gas cooler, las bombas de agua, el intercambiador de calor interno, el tanque de flash gas horizontal y el eyector ajustable que opera en modo de baja elevación de presión. El control y monitoreo se realizan mediante un controlador con registro de datos tipo osciloscopio. Una válvula de tres vías (1) regula la temperatura de entrada del gas cooler utilizando un tanque de agua caliente de 1000 litros (264,2 galones). La Figura 1 muestra el sistema de bomba de calor con R-744 con sus componentes principales. Más detalles sobre las especificaciones y operación del sistema pueden consultarse en Silva et al. (2024).

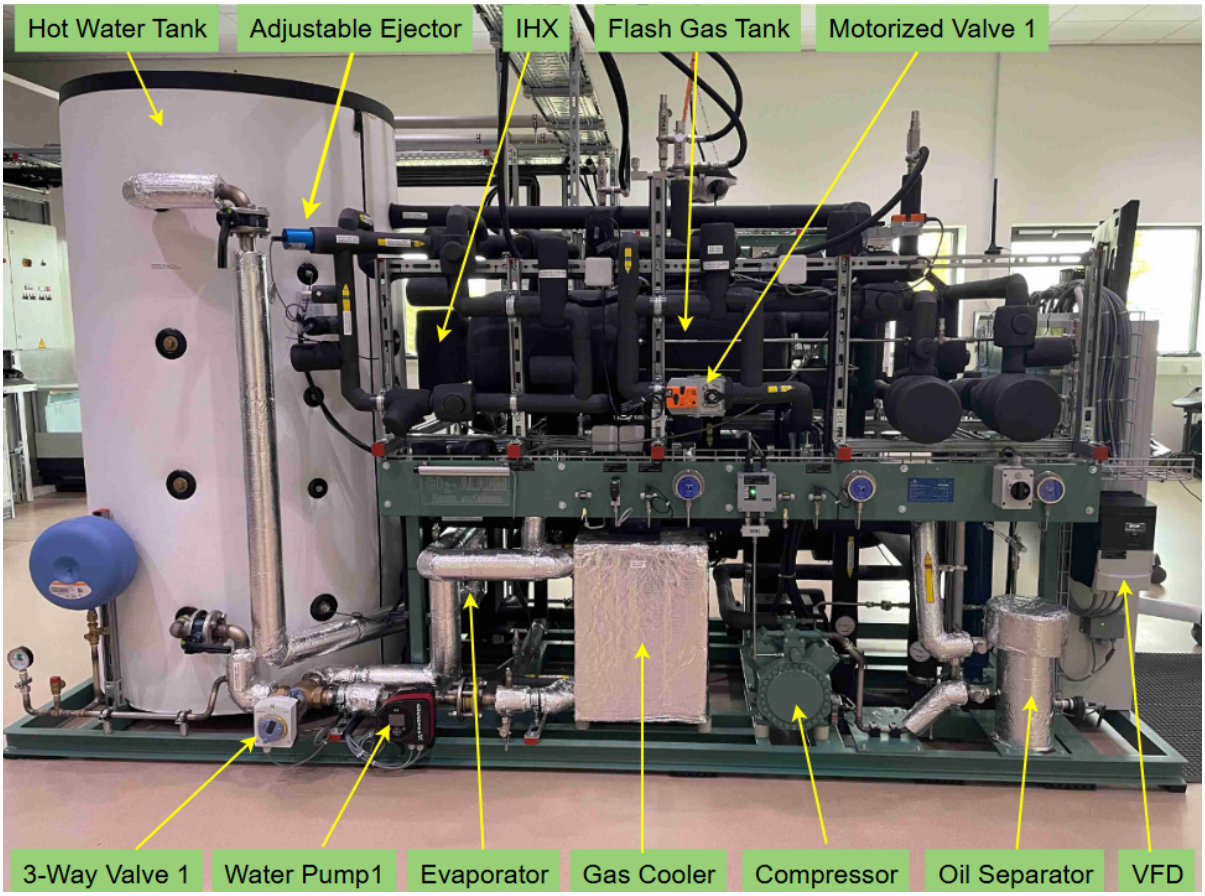

Figura 1. Vista general del sistema de bomba de calor con R-744 instalado en la Academia SCHAUFLER, destacando sus componentes principales.

La Figura 2 muestra el diagrama de tuberías del sistema de bomba de calor con R-744. En estudios previos sobre sistemas industriales de R-744, Simon et al. [16] desarrollaron y validaron modelos de cálculo para eyectores de geometría variable utilizando datos experimentales obtenidos tanto en los sistemas de refrigeración y bomba de calor de la Academia SCHAUFLER como en aplicaciones de campo en instalaciones de fabricantes de equipos originales (OEM). Durante las mediciones iniciales, el sistema operaba sin un caudalímetro Coriolis en la línea de líquido; este componente se ha incorporado posteriormente para mejorar la precisión.

© IIAR 2026

Para verificar la fiabilidad de los datos anteriores, se realizó un análisis comparativo mediante tasas de caudales másicos de líquido promediadas en el tiempo. Estos valores se contrastaron con dos estimaciones independientes de flujo másico: una basada en el balance energético del lado del agua alrededor del *gas cooler* y los mapas del compresor, y otra derivada del rendimiento del eyector y los datos de calidad de vapor. Los resultados mostraron una desviación relativa de solo el 1,6 % (483,3 kg/h [1065,7 lb/h] frente a 475,5 kg/h [1048,4 lb/h]). Entre las mejoras futuras se incluye la instalación de un segundo caudalímetro en la línea de succión del compresor.

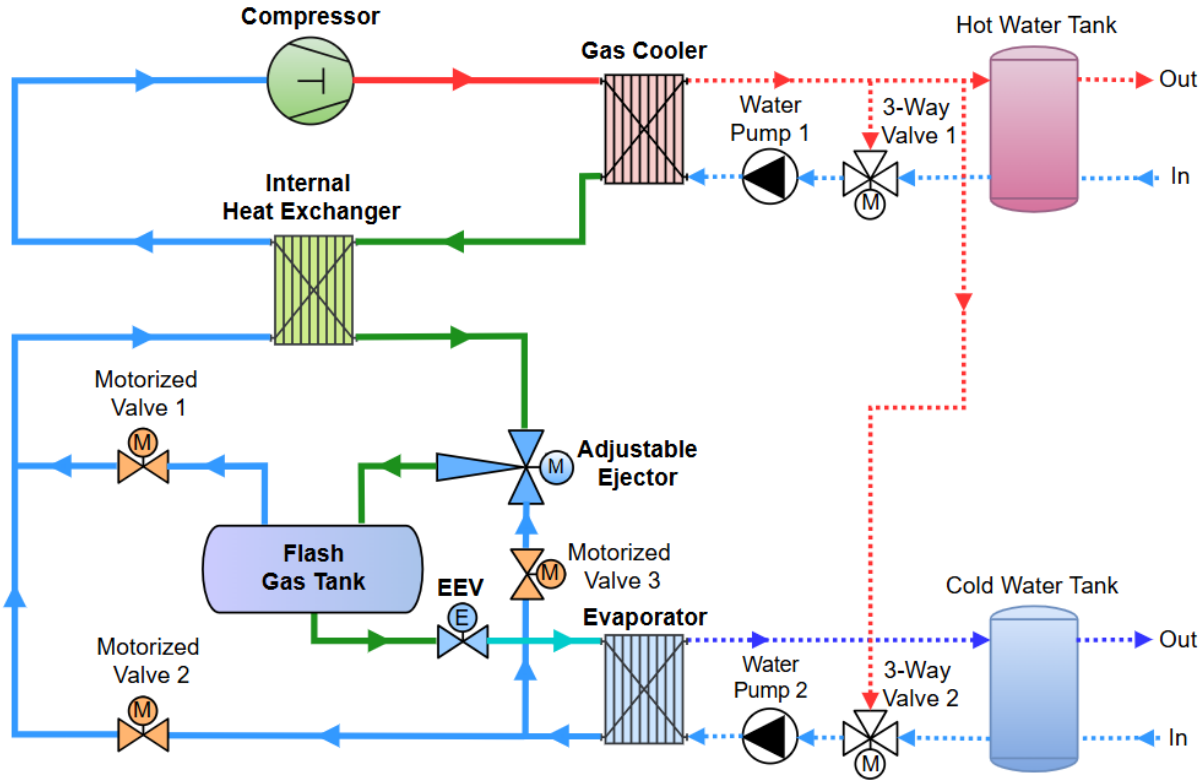

Figura 2. Diagrama simplificado de tuberías del sistema de bomba de calor con R-744 en la Academia SCHAUFLER.

Para respaldar la estrategia de control, el sistema de bomba de calor de R-744 integra un monitoreo continuo de alta presión con el fin de mantener una operación estable

y eficiente. El objetivo es mantener la presión del lado de alta constante mientras se regula la temperatura de salida del agua y la potencia total del sistema mediante el ajuste preciso del caudal de agua. La Figura 3 ilustra que, en el diagrama t–h, calentar agua de 25°C (77°F) a 55°C (131°F) no es posible con una presión del *gas cooler* de 80 bar(a) (1160 psia), como se muestra en la Figura 3(a), ya que esta presión no proporciona las condiciones térmicas necesarias. En cambio, al aumentar la presión a aproximadamente 90 bar(a) (1305 psia), como se muestra en la Figura 3(b), se alcanza la temperatura de salida deseada.

Javerschek (2020) demostró que el aumento de la presión del sistema influye fuertemente en el COP_h, especialmente al cumplir los requisitos mínimos del *pinch-point*. Esto resalta la interdependencia entre la regulación de presión y la eficiencia térmica en bombas de calor con R-744 transcrítico, donde mantener un *pinch-point* reducido (≈ 3 K [5,4°R]) entre el *gas cooler* y el circuito de agua garantiza una transferencia de calor efectiva.

Los resultados de simulación indican que presiones del *gas cooler* entre 85 bar(a) (1233 psia) y 100 bar(a) (1450 psia) ofrecen gradientes térmicos óptimos, particularmente al operar con entrada de agua a 40°C (104°F) y salida a 55°C (131°F). Aunque presiones de descarga más altas reducen el *pinch-point* y mejoran la transferencia térmica, las mejoras en eficiencia disminuyen más allá de este rango óptimo. A 70 Hz y 90 bar(a) (1305 psia), tanto los compresores TE estándar como los TE+ con motor LSPM alcanzaron un *pinch-point* de 3 K (5,4°R), aunque el TE+ mostró una eficiencia ligeramente menor. Los motores LSPM ofrecen un rendimiento superior a frecuencias bajas (≈ 25 Hz) gracias al menor deslizamiento, mayor caudal másico y menores temperaturas de descarga. En conjunto, una regulación adaptativa de alta presión optimiza el COP_h, mejora el intercambio térmico del *gas cooler* y reduce el consumo energético del compresor bajo condiciones térmicas variables.

© IIAR 2026

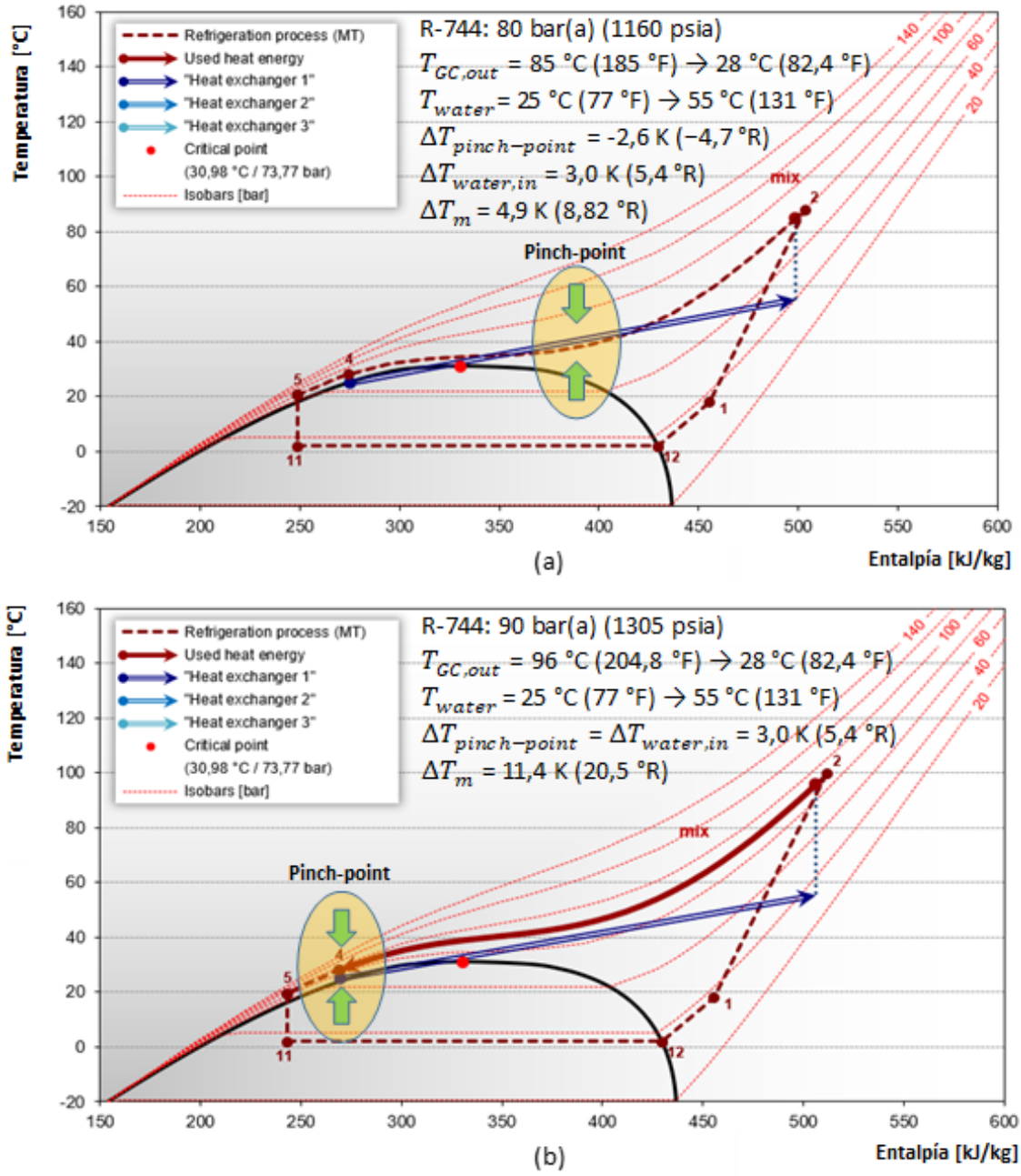

Figura 3. Visualización de la transferencia de calor en el enfriamiento del gas en el diagrama t–h. (a) Presión en el *gas cooler* de 80 bar(a) (1160 psia); (b) Presión en el *gas cooler* de 90 bar(a) (1305 psia).

© IIAR 2026

Este estudio examina el efecto del control del área de la boquilla variable en el eyector del sistema de bomba de calor con R-744 instalado en la Academia SCHAUFLER bajo diferentes condiciones de operación. Los experimentos se realizaron con el compresor funcionando a una frecuencia constante de 48 Hz y una presión en el *gas cooler* de 91 bar(a) (1320 psia) ± 0,4 bar (± 5,8 psi). Las variaciones en el caudal másico se lograron ajustando la temperatura de evaporación a −2,6°C (27,3°F); 2,0°C (35,6°F); 7,0°C (44,6°F) y 10,3°C (50,5°F), con desviaciones promedio en el tiempo de ± 0,1 K (0,18°R) a ± 0,4 K (0,72°R). La temperatura de salida del agua caliente se mantuvo en 43°C (109,4°F) ± 0,3 K (0,54°R) mediante la válvula de tres vías (1), lo que resultó en temperaturas de salida del *gas cooler* con valores promedio entre 30,3°C (86,5°F) y 34,0°C (93,2°F).

Cálculos de desempeño del sistema

Elbel (2011) identificó los parámetros clave para evaluar el rendimiento de los eyectores de expansión bifásica: relación de presiones, elevación de presión, relación de arrastre de masa y eficiencia del eyector. Se obtiene un alto rendimiento cuando se logra una gran elevación de presión junto con un alto caudal másico de succión. La relación de presiones (Ecuación 1) es la razón entre la presión de salida del difusor y la presión de entrada de succión, e indica el grado de aumento de presión. La elevación de presión (Ecuación 2) representa la diferencia entre las presiones de salida del difusor y de entrada de succión. La relación de arrastre de masa (Ecuación 3) es la relación entre el caudal másico de succión y el caudal másico motriz, y refleja la capacidad de arrastre del eyector. Finalmente, la eficiencia del eyector (Ecuación 4) expresa la energía recuperada durante la expansión en relación con el trabajo necesario para comprimir ambos flujos. La Figura 4(a) ilustra el diagrama presión–entalpía del R-744 que se utiliza para definir la eficiencia del eyector, mientras que la Figura 4(b) presenta la configuración del sistema de eyector.

© IIAR 2026

$$\Pi = \frac{P_{diff,\,out}}{P_{suction,\,in}} \tag{1}$$

$$\Delta p = P_{diff,out} - P_{suction,\,in} \tag{2}$$

$$\phi_m = \frac{\dot{m}_{suction}}{\dot{m}_{motive}} \tag{3}$$

$$\eta_{ejector} = \frac{\dot{m}_{suction}}{\dot{m}_{motive}} \times \frac{\Delta h_{compression}}{\Delta h_{expansion}} \tag{4}$$

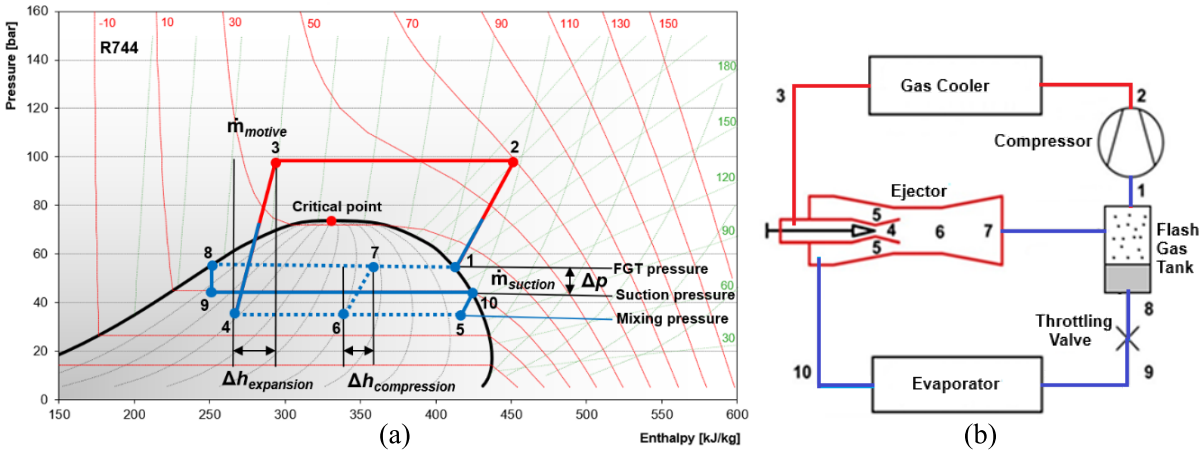

Figura 4. (a) Definición de la eficiencia del eyector utilizando el diagrama presión–entalpía del R-744; (b) Configuración del sistema de eyector.

En las Ecuaciones (1) a (4), Π representa la relación de presión; $P_{diff,out}$ y $P_{suction,in}$ son, respectivamente, la presiones de salida del difusor del eyector y la presión de entrada de la boquilla de succión, ambas en bar. Δp es la elevación de presión en bar. ϕm es la relación de arrastre másico; $\dot{m}_{suction}$ y $\dot{m}_{motive}$ son los caudales másicos de succión y de la boquilla motriz, respectivamente, en kg/s. $\eta_{ejector}$ es la eficiencia del eyector. $\Delta h_{compression}$ y $\Delta h_{expansion}$ representan el aumento de entalpía en la compresión y la disminución de entalpía en la expansión, respectivamente, en kJ/kg. Los cálculos de desempeño del eyector se realizaron conforme a la primera y segunda ley de la termodinámica, considerando las siguientes simplificaciones:

© IIAR 2026

- Se asume que todos los procesos operan en régimen permanente.
- Se desprecian las pérdidas de presión en el *gas cooler*, el evaporador,el IHX y las tuberías.
- La mezcla de aceite del compresor con el refrigerante es despreciable.
- Las variaciones de energía cinética y potencial del fluido de trabajo son despreciables.
- El sistema se considera adiabáticamente aislado, sin intercambio de calor con el entorno.
- Los procesos de expansión y compresión en el eyector son isentrópicos.
- El fluido de trabajo en la entrada del eyector se halla en estado de vapor sobrecalentado o de vapor seco saturado, según las prácticas de modelado termodinámico.

Uno de los indicadores fundamentales de desempeño para evaluar el sistema de bomba de calor de R-744 es el COP_h, que cuantifica la relación entre la capacidad útil de calefacción y la energía consumida, como se define en la Ecuación 5. La contribución del eyector al rendimiento del sistema se analiza mediante la mejora relativa del COP_h obtenida al incorporar el eyector en el ciclo. La Ecuación 6 define la capacidad del *gas cooler*, o la capacidad de calefacción del sistema.

$$COP_h = \frac{\dot{Q}_{gc}}{W_{comp}} \tag{5}$$

$$\dot{Q}_{gc} = \dot{m}_{R-744} \cdot \left(h_{gc,\,in} - h_{gc,out}\right) \tag{6}$$

Donde COP_h es el coeficiente de desempeño en calefacción. $\dot{Q}_{gc}$ es la capacidad del *gas cooler* (o capacidad de calefacción) en kW, y W_{comp} es la potencia absorbida por el compresor en kW. $\dot{m}_{R-744}$ es el caudal másico de R-744 en kg/s; $h_{gc,in}$ y $h_{gc,out}$ son las entalpías específicas en la entrada y salida del gas cooler, respectivamente, expresadas en kJ/kg.

© IIAR 2026

Resultados de los KPIs

Para examinar la relación entre la temperatura de evaporación y los parámetros de desempeño del eyector, incluyendo el área relativa media de la boquilla, la capacidad de calentamiento, la elevación de presión y la eficiencia, se realizaron múltiples pruebas. La Figura 5 presenta los resultados, con un área relativa media de la boquilla (A_m) entre el 73,1 % y el 85,9 %, y una capacidad de calentamiento entre 28,6 kW (97,6 kBTU/h) y 39,1 kW (133,4 kBTU/h), a medida que la temperatura de evaporación varió de −4°C (24,8°F) a 12°C (53,6°F) con una presión de 90 bar (1305 psi). El COP_h durante la operación con baja elevación de presión osciló entre 3,91 y 5,44. Los resultados revelan que la capacidad de calefacción aumenta tanto con mayores aperturas de la boquilla como con temperaturas de evaporación más elevadas, lo que confirma la influencia de la modulación del eyector en el rendimiento del sistema. Sin embargo, estos datos no son directamente aplicables a la evaluación del coeficiente de rendimiento estacional (SCOP) ni del índice de eficiencia energética estacional (SEER) conforme a la norma EN 14825:2022 (European Committee for Standardization, 2022).

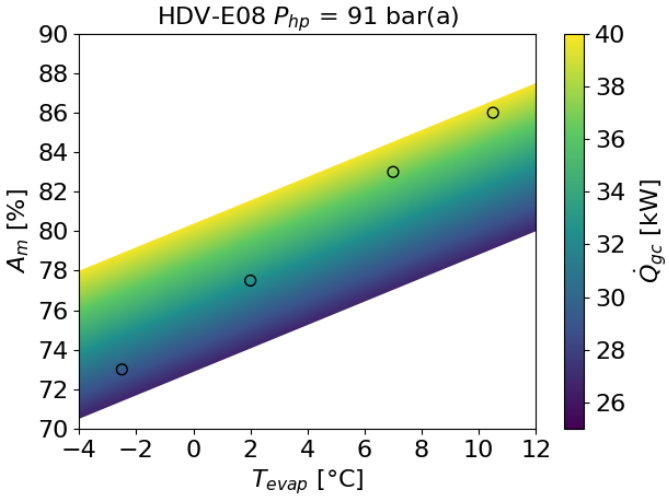

Figura 5. Correlación entre el área relativa media de la boquilla del eyector, la temperatura de evaporación y la capacidad de calefacción.

© IIAR 2026

La Figura 6 muestra el efecto de la temperatura de evaporación sobre la elevación de presión, que varió de 2,2 bar (31,9 psi) a 5,0 bar (72,5 psi) a medida que la temperatura aumentó de −4°C (24,8°F) a 12°C (53,6°F). Se aplicó una regresión cuadrática para extrapolar los datos y verificar su precisión. Para el eyector HDV-E08, las eficiencias se situaron entre 23,0 % y 38,5 %, mientras que los datos comparativos del eyector HDV-E65, presentados por Javerschek et al. (2024), confirmaron tendencias similares. Las incertidumbres estimadas fueron de ± 3 % para el COP_h y la eficiencia, y de ±0,1 bar (1,45 psi) para la elevación de presión. Estos resultados destacan la fuerte influencia de la geometría del eyector sobre la elevación de presión y demuestran que la extrapolación basada en regresión es eficaz para predecir el rendimiento más allá del rango de prueba.

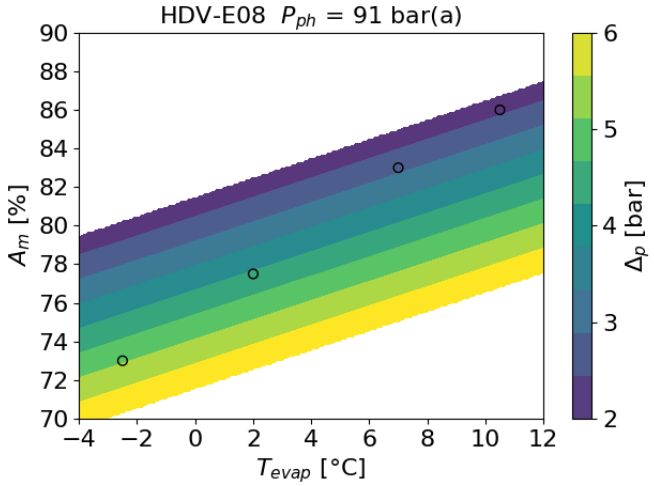

Figura 6. Correlación entre el área relativa media de la boquilla del eyector, la temperatura de evaporación y la elevación de presión.

La Figura 7 muestra que el eyector HDV-E65 proporciona una elevación de presión significativamente mayor que el HDV-E08, en concordancia con la teoría de eyectores, que predice que eyectores de mayor tamaño generan mayor elevación de presión a la misma área relativa de tobera, debido a un mayor caudal másico motriz. Con un área relativa media de boquilla del 73,1 %, el HDV-E65 alcanzó una elevación de

© IIAR 2026

presión de 1,7 bar (24,7 psi) superior, manteniendo niveles de eficiencia similares a los descritos por Elbel (2011). Estos resultados confirman que aumentar el tamaño del eyector incrementa la elevación de presión sin comprometer la eficiencia, y que una modulación precisa del área de la boquilla es fundamental para equilibrar elevación y eficiencia en bombas de calor con R-744 de alta capacidad.

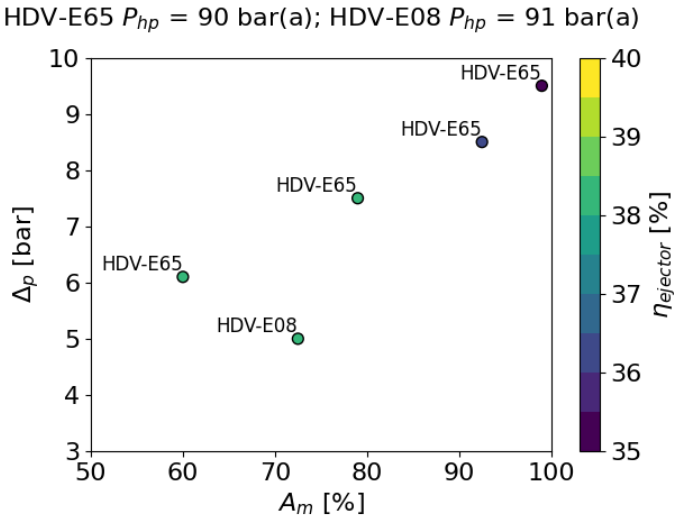

Figura 7. Correlación entre la elevación de presión del eyector, el área relativa media de la boquilla y la eficiencia.

Estrategias de control

Integración del control de apertura del eyector con la frecuencia/potencia del compresor

Los compresores controlados por presión de succión responden de forma inherente a las variaciones de la carga de refrigeración, las cuales influyen directamente en la demanda de potencia del compresor y en la carga térmica del *gas cooler*. Para mantener una eficiencia óptima, el exceso de calor debe disiparse de manera efectiva. La integración del grado de apertura del eyector con la carga del compresor tiene

como objetivo mejorar la estabilidad y la eficiencia del sistema al correlacionar la carga de refrigeración con el calor rechazado en el *gas cooler*. Tradicionalmente, sin embargo, la operación del compresor controlado por succión y la regulación de presión del gas cooler se han gestionado como lazos de control independientes. El controlador del *gas cooler* mantiene una presión óptima que varía en función de la carga térmica que debe disiparse.

Factores externos como la temperatura ambiente, la velocidad de los ventiladores, la radiación solar y el ensuciamiento introducen perturbaciones que afectan la transferencia de calor. Vincular directamente la apertura del eyector con la carga del compresor ignoraría estas influencias, lo que daría lugar a una configuración de control en lazo abierto para el *gas cooler*. Por ello, se prefiere un control en lazo cerrado basado en la temperatura de salida del agua o del aire y en la correspondiente presión óptima. La experiencia en campo indica que la coordinación de la operación de los ventiladores, tanto en número como en velocidad, con el desempeño del compresor puede mejorar la eficiencia global del sistema. En consecuencia, diversos estudios se han centrado en estrategias avanzadas de control que integran la operación del eyector dentro del marco global del sistema para mejorar el rendimiento y la fiabilidad (Nawaz et al., 2018; Rony et al., 2019).

Control del pinch-point

En las bombas de calor y sistemas de refrigeración que utilizan R-744 como refrigerante, la curva del gas cooler se selecciona normalmente para maximizar el COP_h, equilibrando la potencia suministrada con una presión alta específica y la temperatura de salida del *gas cooler* (Okasha y Müller, 2018). La Figura 8(a) muestra que la temperatura de evaporación es otro parámetro importante en el proceso de optimización del COP_h. Sin embargo, las mediciones experimentales realizadas con intercambiadores de calor de placas han mostrado una diferencia entre las temperaturas de salida del *gas cooler* y la entrada del agua caliente.

© IIAR 2026

La Tabla 1 muestra el efecto de la variación del diferencial de temperatura sobre la reducción del COP_h, en relación con una referencia de diseño de 1,9 K (3,4°R). En la configuración ensayada, el control del *gas cooler* mantuvo un diferencial de temperatura de 4,2 K (7,6°R). Las mediciones experimentales se realizaron con temperaturas del agua caliente entre 30°C (86°F) y 50°C (122°F), manteniendo un caudal de agua constante, control del diferencial de temperatura entre la salida del *gas cooler* y la entrada del agua caliente, y control de velocidad del compresor para proporcionar la carga térmica requerida.

ΔT (temp salida del gas cooler – temp entrada de agua caliente), K (°R)	1,00 (1,8)	2,01 (3,62)	2,99 (5,38)	4,00 (7,2)	5,00 (9,0)	5,34 (9,61)
Temp de salida del *gas cooler*,°C (°F)	31,01 (87,82)	32,00 (89,60)	33,00 (91,40)	34,00 (93,20)	35,00 (95,00)	35,35 (95,63)
Temp de entrada del agua caliente,°C (°F)	30,01 (86,02)	29,99 (85,98)	30,01 (86,02)	30,00 (86,00)	30,00 (86,00)	30,01 (86,02)
Presión alta, bar (psi)	89,49 (1298,1)	88,15 (1278,8)	87,26 (1265,9)	86,22 (1250,8)	84,27 (1222,5)	80,76 (1171,6)
Reducción del COP_h, (%)	101,10	100,00	98,40	96,20	90,10	82,60
Δη,(%)	1,1	0,0	-1,6	-3,8	-9,9	-17,4

Tabla 1. Efecto del aumento del diferencial de temperatura entre la salida del *gas cooler* y la entrada del agua caliente en la reducción del COP_h.

Un enfoque alternativo consiste en controlar directamente el diferencial de temperatura de diseño entre la salida del *gas cooler* y la entrada del agua caliente. El objetivo es mantener la diferencia mínima de temperatura en la salida del *gas cooler*. Esta estrategia se conoce como control del *pinch-point*. La Figura 8(b) ilustra este principio aplicado al *gas cooler*. Esta técnica utiliza el diferencial de temperatura deseado, determinado idealmente a partir de las especificaciones de diseño del *gas cooler*, como valor de *setpoint* de control. Posteriormente, la presión del sistema se ajusta dinámicamente para alcanzar la máxima eficiencia operativa. Cuando el diferencial de temperatura medido supera el *setpoint*, la presión aumenta hasta que

el diferencial regresa al valor objetivo. Por el contrario, cuando el diferencial medido cae por debajo del valor fijado, la presión disminuye hasta igualar el valor deseado.

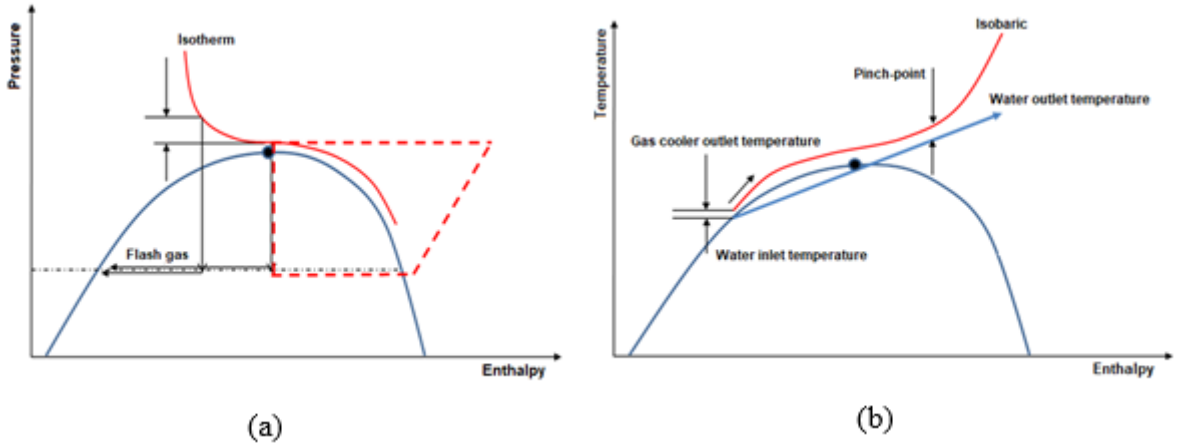

Figura 8. (a) Optimización del según las temperaturas de evaporación. (b) Control del pinch-point en el *gas cooler*.

La Tabla 2 resume las condiciones de operación del gas cooler para temperaturas del agua caliente entre 30°C (86°F) y 50°C (122°F) bajo diferentes presiones altas constantes. El aumento del *setpoint* de alta presión incrementa la capacidad de calefacción hasta un valor óptimo, a partir del cual una presión excesiva reduce el COP_h sin proporcionar beneficios adicionales. El control mediante la curva del *gas cooler* (GC-Curve) ofrece un COP_h favorable en relación con la potencia del compresor, mientras que el control con *pinch-point* de 1 K (1,8°R) proporciona el mayor COP_h junto con una mayor capacidad de calefacción.

Las pruebas se realizaron con caudal de agua, velocidad del compresor y temperaturas de entrada constantes. Las mediciones, realizadas con un evaporador por gravedad y uno de expansión directa conectados en serie, mostraron que la apertura del eyector seguía la señal de control, sin intercambiador de calor interno. El control por *pinch-point* logró una extracción de calor eficiente, lo que confirma resultados coherentes con los obtenidos por Liao y Jakobsen (1998) en diferentes temperaturas de evaporación.

© IIAR 2026

Estrategia de control del *gas cooler*	*Setpoint* 4,2 K (7,56°R)	*Setpoint* 88 bar (1276 psi)	*Setpoint* 90 bar (1305 psi)	*Setpoint* 92 bar (1334 psi)	*Setpoint* 94 bar (1363 psi)	*Setpoint* 96 bar (1392 psi)	*Pinch-point* 1,0 K (1,8°R)	GC-Curve
Potencia absorbida del compresor, kW	7,88	8,08	8,32	8,57	8,79	9,02	8,48	7,92
COP_h	3,83	3,85	3,88	3,84	3,82	3,69	3,88	3,85
Elevación de presión del eyector, bar (psi)	5,83 (84,6)	5,44 (78,9)	5,13 (74,4)	5,00 (72,5)	4,96 (71,9)	5,03 (73,0)	5,01 (72,7)	5,74 (83,2)
Capacidad de calefacción, kW (kBTU/h)	30,20 (103,0)	31,10 (106,1)	32,26 (110,0)	32,90 (112,2)	33,56 (114,5)	33,34 (113,8)	32,94 (112,4)	30,47 (104,0)
Temperatura de entrada del eyector, °C (°F)	31,20 (88,16)	29,64 (85,35)	27,20 (80,96)	25,93 (78,67)	25,44 (77,79)	25,45 (77,81)	26,23 (79,21)	30,91 (87,64)
Presión de succión, bar (psi)	41,54 (602,4)	41,25 (598,2)	40,89 (593,0)	40,73 (590,7)	40,69 (590,1)	40,71 (590,4)	40,77 (591,3)	41,59 (603,1)
Temperatura de succión,°C (°F)	8,91 (48,04)	8,61 (47,50)	8,22 (46,80)	8,01 (46,42)	7,95 (46,31)	7,96 (46,33)	8,08 (46,54)	5,56 (42,01)
Presión de succión del eyector, bar (psi)	35,72 (518,1)	35,82 (519,6)	35,76 (518,7)	35,71 (518,0)	35,71 (518,0)	35,66 (517,3)	35,75 (518,6)	35,87 (520,1)
Setpoint de presión alta, bar (psi)	86,61 (1256,2)	88,00 (1276,3)	90,00 (1305,3)	92,00 (1334,3)	94,00 (1363,3)	96,00 (1392,4)	91,36 (1325,5)	86,45 (1253,9)
Presión alta, bar (psi)	85,93 (1246,9)	88,00 (1276,3)	89,99 (1305,1)	92,04 (1334,9)	94,03 (1363,7)	96,04 (1392,9)	91,37 (1325,7)	86,59 (1255,9)
Apertura del eyector, (%)	62,45	28,45	23,23	20,71	19,70	18,88	21,27	35,27
Temp de salida del agua caliente,°C (°F)	50,03 (122,05)	50,79 (123,42)	51,60 (124,88)	51,94 (125,49)	52,17 (125,91)	52,28 (126,10)	51,98 (125,56)	50,34 (122,61)
Temp de entrada del agua caliente,°C (°F)	29,99 (85,98)	29,95 (85,91)	29,92 (85,86)	29,90 (85,82)	29,88 (85,78)	30,12 (86,22)	30,01 (86,02)	30,02 (86,04)
Temp de salida del *gas cooler*,°C (°F)	34,18 (93,52)	33,35 (92,03)	31,79 (89,22)	30,79 (87,42)	30,40 (86,72)	30,55 (86,99)	30,97 (87,75)	34,09 (93,36)
Temp de entrada del *gas cooler*,°C (°F)	68,54 (155,37)	70,33 (158,59)	72,73 (162,91)	75,09 (167,16)	77,14 (170,85)	79,12 (174,42)	74,60 (166,28)	69,03 (156,25)
Velocidad del compresor, (%)	30,12	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
Temp de salida del agua fría,°C (°F)	5,08 (41,14)	4,89 (40,80)	4,67 (40,41)	4,55 (40,19)	4,55 (40,19)	4,56 (40,21)	4,60 (40,28)	5,08 (41,14)
Temp de entrada del agua fría,°C (°F)	10,00 (50,00)	9,99 (49,98)	9,98 (49,96)	9,97 (49,95)	10,00 (50,00)	10,00 (50,00)	9,98 (49,96)	10,02 (50,04)
Caudal de agua caliente, m³/h (CFM)	1,25 (0,74)	1,25 (0,74)	1,25 (0,74)	1,25 (0,74)	1,25 (0,74)	1,25 (0,74)	1,25 (0,74)	1,25 (0,74)
Caudal de glicol (30%), m³/h (CFM)	4,74 (2,79)	4,73 (2,78)	4,72 (2,78)	4,72 (2,78)	4,72 (2,78)	4,72 (2,78)	4,73 (2,78)	4,74 (2,79)
$\Delta T_{pinch\text{-}point}$, K (°R)	4,19 (7,54)	3,40 (6,12)	1,88 (3,38)	0,89 (1,60)	0,52 (0,94)	0,43 (0,77)	0,97 (1,75)	4,07 (7,33)

Tabla 2. Resumen de la estrategia de control del *gas cooler* para temperaturas del agua caliente entre 30°C (86°F) y 50°C (122°F) bajo diferentes *setpoints* de alta presión.

Aplicación de eyectores de líquido

La Figura 9 ilustra la aplicación de eyectores de líquido en sistemas transcríticos con R-744, los cuales mejoran la estabilidad de los evaporadores inundados al extraer el líquido del recipiente adicional, donde el sobrecalentamiento se reduce aproximadamente a 0 K (0°R). Esto permite una operación completamente inundada, reduce la relación de presiones y la carga de trabajo del compresor, lo que mejora la eficiencia global del sistema. Sin embargo, este método introduce el riesgo de arrastre de líquido hacia el compresor, lo que puede causar desplazamiento de aceite, mala lubricación e inestabilidad operativa. Para evitarlo, los sistemas emplean un intercambiador de calor interno que garantiza la vaporización completa, o bien un separador vapor–líquido que elimina el exceso de refrigerante líquido. El separador se drena periódicamente mediante un eyector de líquido ubicado en el lado de alta presión, que se activa cuando el nivel de líquido supera un valor límite. Esta configuración mejora la eficiencia energética y la fiabilidad del sistema, manteniendo niveles estables de refrigerante bajo condiciones de carga variables.

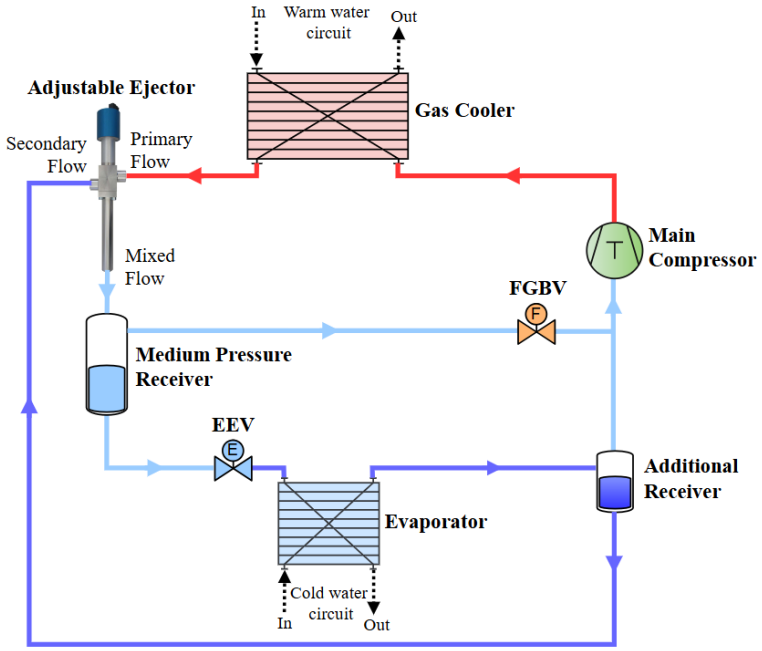

Figura 9. Integración del eyector de líquido para extraer refrigerante del recipiente adicional durante la operación del evaporador inundado.

© IIAR 2026

Aplicación de eyectores de gas con elevación de alta presión

La Figura 10 muestra una configuración de elevación de alta presión en la que el eyector transfiere refrigerante desde el nivel de succión del evaporador hasta el recipiente de presión media. Una parte del caudal másico del evaporador pasa a través del eyector hacia el receptor de presión media, mientras que el caudal másico restante regresa al compresor principal. Si la presión de succión del eyector disminuye debido a una baja presión de descarga o a una reducción del caudal másico, el compresor principal compensa en consecuencia. Para evitar el flujo inverso, se emplea una válvula de retención o una válvula modulante, que se abre únicamente cuando la presión del lado de alta, el caudal másico del refrigerante y la presión de succión cumplen condiciones umbral predefinidas. El compresor paralelo recomprime el vapor extraído del recipiente de presión media y opera en coordinación con la válvula de *flash gas bypass* (FGBV). Cuando la presión de succión del eyector aumenta, la FGBV vuelve a activarse, lo que mantiene una distribución adecuada del caudal másico, estabilidad de presión y una operación eficiente bajo condiciones de carga variables.

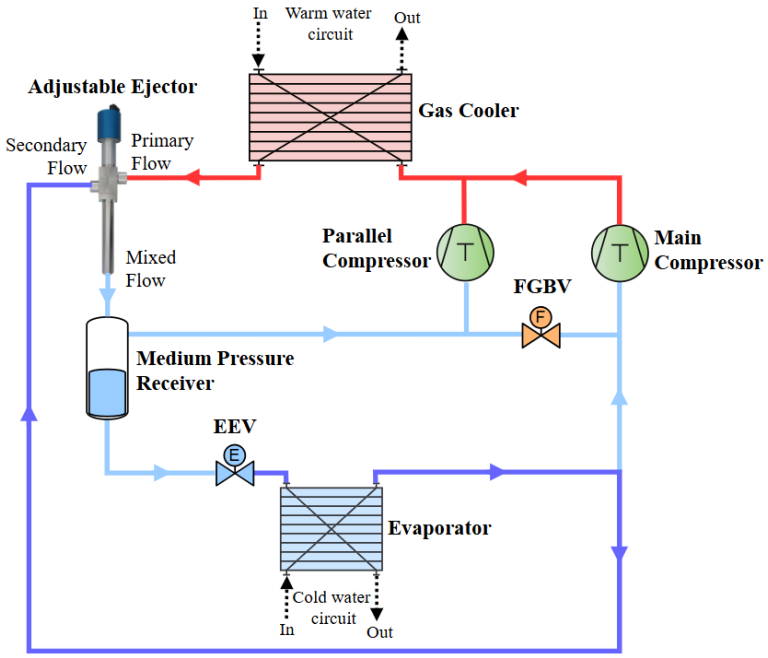

Figura 10. Integración del eyector de gas en configuración de elevación de alta presión.

Aplicación de eyectores de gas con elevación de baja presión

La Figura 11 muestra una configuración de elevación de baja presión en la que el eyector retorna todo el caudal másico de refrigerante desde el evaporador hasta el nivel de presión media, lo que elimina la necesidad de un compresor principal y una válvula de control de alta presión. En esta configuración, el eyector mantiene la elevación de presión operando a caudal motriz máximo. Sin embargo, puede producirse flujo inverso de refrigerante, ya que el control de la presión de succión depende únicamente del eyector. En algunos sistemas, una bomba de refrigerante o una disposición adecuada con válvulas permite la conmutación a una configuración de dos etapas. En este caso, el compresor paralelo regula tanto la presión intermedia como la presión de succión del evaporador, mediante transductores de presión que garantizan la estabilización dinámica y una operación eficiente bajo condiciones operativas variables.

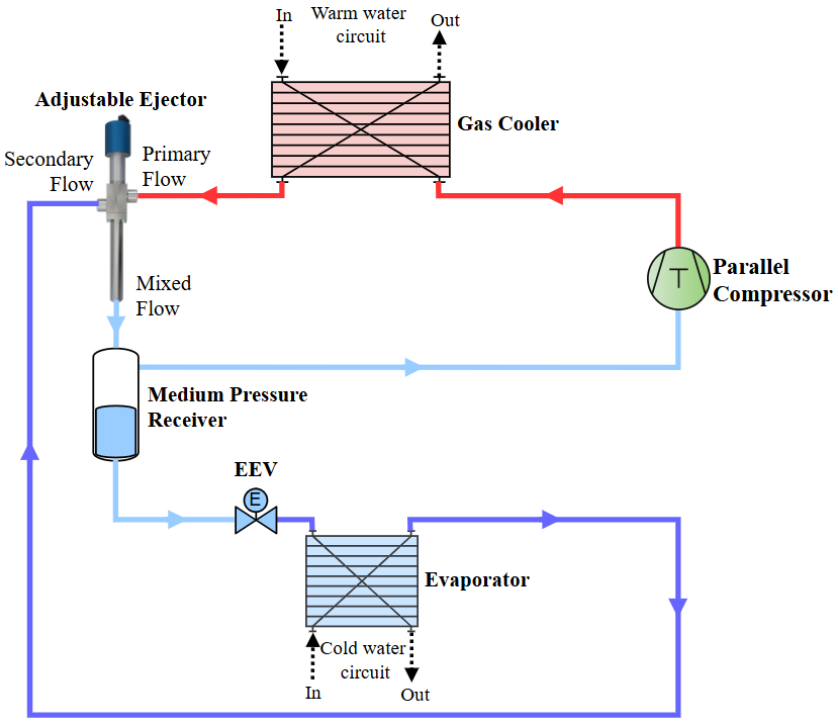

Figura 11. Integración del eyector de gas en configuración de elevación de baja presión.

© IIAR 2026

Análisis adicional de las estrategias de control de eyectores

Las estrategias de control eficaces de los eyectores en sistemas de refrigeración y bombas de calor son esenciales para mantener un rendimiento óptimo y una operación estable. Los eyectores regulan la potencia de succión mediante la interacción de las presiones alta, intermedia y de succión, que deben mantenerse dentro de límites estables para evitar pérdidas de eficiencia. Los controladores tradicionales, como los de tipo PID, de dos puntos y de tres puntos, son ampliamente utilizados por su simplicidad, aunque presentan limitaciones en condiciones dinámicas. Los controladores complementarios pueden mejorar la respuesta transitoria al compensar desviaciones significativas.

Las estrategias de control adaptativo ofrecen mayor flexibilidad al ajustar las acciones de control en tiempo real para adaptarse a las condiciones variables del sistema, especialmente durante las transiciones entre los regímenes de operación subcrítico y transcrítico. Estos controladores integran modelos basados en componentes, como evaporadores y eyectores, para predecir mejor el caudal másico y el comportamiento de la transferencia de calor. Los sistemas modernos sincronizan la operación de eyectores, válvulas de expansión y compresores para mantener presiones de succión e intermedias estables. La modificación del *setpoint* de la presión intermedia puede influir significativamente en el desempeño del eyector, especialmente en aplicaciones de baja elevación de presión, donde el eyector regula la presión alta.

© IIAR 2026

Conclusión

Este estudio presenta los avances recientes en sistemas de bomba de calor de R-744 con eyectores, con énfasis en configuraciones de baja presión de elevación. Los experimentos realizados en la Academia SCHAUFLER demostraron que los eyectores con boquilla ajustable mejoran la eficiencia, con capacidades de calefacción de 28,6 kW (97,6 kBTU/h) a 39,1 kW (133,4 kBTU/h), COP_h de 3,91 a 5,44, y elevaciones de presión de 2,2 bar (31,9 psi) a 5,0 bar (72,5 psi), con eficiencias del 23 al 38,5 % para el eyector HDV-E08. Los modelos de mayor tamaño, como el HDV-E65, lograron mayores elevaciones de presión, lo que destaca ka importancia de una selección y dimensionamiento adecuados. Las estrategias avanzadas de control, incluyendo la regulación por *pinch-point* y los algoritmos adaptativos, demostraron ser eficaces para estabilizar presiones y mejorar el intercambio térmico. En general, las bombas de calor con R-744 equipadas con eyectores ajustables demostraron una elevada eficiencia y estabilidad bajo condiciones fuera del punto de diseño, lo que proporciona una base sólida para futuras optimizaciones, el desarrollo de gemelos digitales y su integración en aplicaciones de redes de calefacción distrital y recuperación de calor.

© IIAR 2026

Nomenclatura

A_m	Área relativa media de la boquilla (%)
COP	Coeficiente de rendimiento (-)
COP_h	Coeficiente de rendimiento en calefacción (-)
h	Entalpía (kJ/kg)
$h_{gc,in}$	Entalpía específica a la entrada del gas cooler (kJ/kg)
$h_{gc,out}$	Entalpía específica a la salida del gas cooler (kJ/kg)
$\dot{m}_{R\text{-}744}$	Caudal másico de R-744 (kg/s)
$\dot{m}_{motive}$	Caudal másico motriz del eyector (kg/s)
$\dot{m}_{suction}$	Caudal másico de succión del eyector (kg/s)
P_{hp}	Presión de descarga (bar)
$P_{suction,in}$	Presión de entrada a la boquilla de succión del eyector (bar)
$P_{diff,out}$	Presión de salida del difusor del eyector (bar)
$\dot{Q}_{gc}$	Capacidad del gas cooler (capacidad de calefacción) (kW)
t	Temperatura (°C)
T_{evap}	Temperatura de evaporación (°C)
$T_{GC,out}$	Temperatura de la salida del gas cooler (°C)
T_{water}	Elevación de temperatura del agua (°C)
W_{comp}	Potencia absorbida del compresor (kW)

Símbolos griegos

$\eta_{ejector}$	Eficiencia del eyector (%)
ϕ_m	Relación de arrastre másico del eyector (-)
$\Delta\eta$	Variación de la eficiencia de calefacción (%)
$\Delta h_{compression}$	Aumento de entalpía en la compresión (kJ/kg)
$\Delta h_{expansion}$	Disminución de entalpía en la expansión (kJ/kg)
Δp	Elevación de presión (bar)
ΔT	Diferencia de temperatura (K)

ΔT_m	Diferencia media de temperatura (K)
$\Delta T_{pinch-point}$	Diferencia de temperatura en el *pinch-point* (K)
$\Delta T_{water,in}$	Diferencia de temperatura del agua de entrada (K)
Π	Relación de presión (-)

Acrónimos

EEV	Válvula de expansión electrónica
EN	Norma europea
FGB	*Flash gas bypass*
FGV	Válvula de flash gas bypass
GC	*Gas cooler*
GC-Curve	Control de la curva del *gas cooler*
HDV	Serie de eyectores ajustables
Hz	Hercio (unidad de frecuencia)
IHX	Intercambiador de calor interno
KPIs	Indicadores clave de desempeño
kW	Kilovatio
LSPM	Motor de imanes permanentes de arranque directo
LT	Baja temperatura
MT	Media temperatura
PAO	Potencial de agotamiento del ozono
PCG	Potencial de calentamiento global
PID	Proporcional-integral-derivativo
rpm	Revoluciones por minuto
R-744	Dióxido de carbono (CO_2)
SUS	Segundos universales Saybolt (unidad empírica de viscosidad)
TE	Serie de compresores para R-744 transcrítico con motor asíncrono
TE +	Serie de compresores para R-744 transcrítico con motor LSPM

© IIAR 2026

Agradecimientos

Los autores agradecen sinceramente todo el apoyo, la asistencia técnica y los materiales de investigación proporcionados para este estudio por el College of Engineering de la University of Alabama, BITZER US, BITZER Kühlmaschinenbau GmbH, la Academia SCHAUFLER, Wurm GmbH & Co. KG y la empresa E-jector AG.

Referencias

ATMOsphere. (2025). *Natural refrigerants: State of the industry. Refrigeration in Europe, North America, Japan, Australia, New Zealand and Latin America* (2024 Report). https://atmosphere.cool/wp-content/uploads/2025/02/2024_ATMO_Marketreport-compressed.pdf

Barta, R. B., Dhillon, P., Braun, J. E., Ziviani, D., & Groll, E. A. (2021). Design and optimization strategy for ejectors applied in refrigeration cycles. *Applied Thermal Engineering*, 189, 116682. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116682

de Boer, R., Marina, A., Zühlsdorf, B., Arpagaus, C., Bantle, M., Wilk, V., Elmegaard, B., Corberán, J., & Benson, J. (2020). *Strengthening industrial heat pump innovation: Decarbonizing industrial heat*. https://orbit.dtu.dk/en/publications/aa0f3bc9-0556-43a1-8ef7-1d3e64723ddc

Ding, H., Dong, Y., Yang, Y., & Wen, C. (2024). Performance and energy utilization analysis of transcritical CO_2 two-phase ejector considering non-equilibrium phase changes. *Applied Energy*, 372, 123810. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123810

Elbel, S. (2011). Historical and present developments of ejector refrigeration systems with emphasis on transcritical carbon dioxide air-conditioning applications.

International Journal of Refrigeration, 34(7), 1545–1561. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2010.11.011

Elbel, S., & Hrnjak, P. (2008). Experimental validation of a prototype ejector designed to reduce throttling losses encountered in transcritical R-744 system operation. *International Journal of Refrigeration*, 31(3), 411–422. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2007.07.013

European Committee for Standardization. (2022). *Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps, with electrically driven compressors, for space heating and cooling, commercial and process cooling: Testing and rating at part load conditions and calculation of seasonal performance* (EN 14825:2022).

Gullo, P., Birkelund, M., Kriezi, E. E., & Kærn, M. R. (2021). Novel flow modulation method for R-744 two-phase ejectors—Proof of concept, optimization and first experimental results. *Energy Conversion and Management*, 237, 114082. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114082

Gullo, P., Kærn, M. R., Haida, M., Smolka, J., & Elbel, S. (2020). A review on current status of capacity control techniques for two-phase ejectors. *International Journal of Refrigeration*, 119, 64–79. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.07.014

Javerschek, O. (2020, 6 de julio). Calculation, simulation and applications of commercial and light industrial CO_2 heat pumps [Seminario web]. Eurammon. https://2020.eurammon.com/images/eurammon/events/symposium-2020/presentations/Day-5-Javerschek-Calculation-Simulation-and-Application-of-Commercial-and-Light-Industrial-CO2-Heat-Pumps.pdf

Javerschek, O., Silva, A., & Boscan, M. (2024). R-744 heat pumps with ejectors: Projects, objectives and results [Ponencia]. 11th IIR Conference on Compressors and Refrigerants, Bratislava, Eslovaquia. https://doi.org/10.18462/iir.compr.2024.0629

 © IIAR 2026

Lawrence, N., & Elbel, S. (2019). Experimental investigation on control methods and strategies for off-design operation of the transcritical R-744 two-phase ejector cycle. *International Journal of Refrigeration*, 106, 570–582. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.04.020

Liao, S., & Jakobsen, A. (1998, 2–5 de junio). Optimal heat rejection pressure in transcritical carbon dioxide air conditioning and heat pump systems [Ponencia]. Natural Working Fluids '98, IIR Gustav Lorentzen Conference, Oslo, Noruega. https://iifiir.org/en/fridoc/optimal-heat-rejection-pressure-in-transcritical-carbon-dioxide-air-17036

Liu, G., Li, H., Lu, Z., & Gong, Y. (2023). Self-optimized efficient operation of trans-critical CO_2 ejector-expansion heat pump water heater system with two-stage evaporation. *Energy and Buildings*, 300, 113659. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113659

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2021). Accelerating decarbonization of the U.S. energy system. The National Academies Press. https://doi.org/10.17226/25932

Nawaz, K., Shen, B., Elatar, A., Baxter, V. D., & Abdelaziz, O. (2018). Performance optimization of CO_2 heat pump water heater. *International Journal of Refrigeration*, 85, 213–228. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2017.09.027

Okasha, A., & Müller, N. (2018, 9–12 de julio). Simulation and performance correlation for transcritical CO_2 heat pump cycle [Ponencia]. 17th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, West Lafayette, Indiana. https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article = 3055&context = iracc

Rony, R. U., Yang, H., Krishnan, S., & Song, J. (2019). Recent advances in transcritical CO_2 (R-744) heat pump system: A review. *Energies*, 12(3), 457. https://doi.org/10.3390/en12030457

Silva, A., Javerschek, O., & Simon, F. (2024, 11–14 de agosto). R-744 heat pumps with ejectors for heating and/or cooling: Opportunities, challenges, and results [Ponencia]. 16th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants, University of Maryland, College Park, MD. https://doi.org/10.18462/iir.gl2024.1177

Simon, F., Pfaffl, J., & Javerschek, O. (2022, 11–14 de julio). Introduction of an ejector for industrial scale CO_2 systems [Ponencia]. 19th International Refrigeration and Air-Conditioning Conference at Purdue, West Lafayette, Indiana. https://docs.lib.purdue.edu/iracc/2493

Sisti, E., Rossetti, A., Minetto, S., Marinetti, S., Tosato, G., Beghi, A., & Rampazzo, M. (2023). Assessment of basic control strategies through dynamic simulations: A CO_2-based chiller under extreme off-design conditions. *Energy and Buildings*, 289, 113066. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113066

Xu, X. X., Chen, G. M., Tang, L. M., & Zhu, Z. J. (2012). Experimental investigation on performance of transcritical CO_2 heat pump system with ejector under optimum high-side pressure. *Energy*, 44(1), 870–877. https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.04.062

Zhu, J., & Elbel, S. (2020). Experimental investigation into the influence of vortex control on transcritical R-744 ejector and cycle performance. *Applied Thermal Engineering*, 164, 114418. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114418

 © IIAR 2026

Notes:

© IIAR 2026