



Papel Blanco

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

Papel Blanco

Mejora de la fiabilidad de la refrigeración con CO₂: el papel de los evaporadores de 90 bar en un futuro con bajo potencial de calentamiento global (GWP)

Hiram de la Torre Salinas

Resumen

El dióxido de carbono (CO₂) ha surgido como un refrigerante natural líder en la refrigeración comercial debido a su potencial de calentamiento global ultrabajo (GWP de 1), su eficiencia energética y su alineación con las normativas internacionales de reducción progresiva. Sin embargo, la fiabilidad del sistema, la preservación de la carga en caso de cortes de energía o tiempos muertos del sistema y la resiliencia operativa siguen siendo preocupaciones clave para los usuarios finales y los diseñadores.

Este libro blanco explora el papel crítico que desempeñan los evaporadores clasificados a 90 bar en la mejora del rendimiento, la resiliencia y la sostenibilidad de los sistemas de refrigeración con CO₂. Al permitir periodos de paro más largos sin ventear refrigerante, soportar prácticas familiares de soldadura con cobre/hierro y reducir la necesidad de energía de emergencia o de una unidad condensadora de respaldo, los evaporadores de 90 bar, combinados con sistemas de lado de alta presión a 90 bar, suponen una inversión estratégica en fiabilidad y eficiencia del costo a lo largo del ciclo de vida.

Introducción

El sector de la refrigeración está evolucionando rápidamente hacia alternativas con un bajo potencial de calentamiento global (PCG), impulsado por las regulaciones ambientales, las expectativas de los consumidores y los objetivos corporativos de sostenibilidad. El CO₂ (R-744) se ha convertido en una solución líder, particularmente para supermercados, almacenamiento en frío y aplicaciones de procesamiento de alimentos.

El CO₂ también está ganando popularidad como refrigerante en aplicaciones industriales, ya que los usuarios finales y los contratistas buscan alternativas al amoníaco (NH₃) y a los refrigerantes sintéticos que se están eliminando gradualmente por regulaciones ambientales.

Sin embargo, los sistemas con CO₂ presentan desafíos de ingeniería únicos:

- Presiones de operación más altas
- Gestión de la presión del tanque flash durante interrupciones
- Escasez de refrigerante debido a las grandes cargas de CO₂
- Sensibilidad a eventos de pérdida de energía

Estos desafíos conllevan riesgos de pérdida de refrigerante, deterioro del producto y requisitos de infraestructura de emergencia, todo lo cual puede mitigarse mediante sistemas con clasificación de mayor presión, incluidos los evaporadores.

Evaporadores de 90 bar

Habilitando paros prolongados

Una ventaja crítica de los evaporadores de 90 bar es su mayor tolerancia al aumento de presión durante cortes de energía o eventos de servicio, lo que reduce la probabilidad de venteo a través de las válvulas de alivio de presión. Cuando un sistema se detiene, la temperatura del CO₂ aumenta y la presión se incrementa en consecuencia. Si bien el venteo es posible en cualquier sistema, los sistemas tradicionales de 45-60 bar son mucho más propensos a requerir descarga a través de la válvula de alivio o enfriamiento auxiliar, ya que sus clasificaciones de presión están por debajo de la presión habitual de reposo del CO₂ a temperaturas ambientales más altas.

Beneficios clave de la clasificación a 90 bar

- Mayor tiempo fuera de operación del sistema sin ventear refrigerante
- Preservación de la carga completa de CO₂, evitando costos de liberación y recarga
- Mayor fiabilidad operativa durante interrupciones o mantenimiento

Esta capacidad de mayor presión ofrece tranquilidad y apoya directamente los objetivos de sostenibilidad. Ver la Tabla 1 para conocer los tiempos que un sistema de CO₂ puede permanecer fuera de línea antes de liberar la carga. Estos tiempos provienen de datos medidos de un experimento real enfocado en el tanque flash. Se construyó un ensamblaje de tanque flash, se llenó con CO₂ líquido y se calentó a una temperatura sostenida de 115 °F (46 °C) para representar una condición realista de verano al exterior.

	45 bar (650 psi) (estándar actual)	80 bar (1160 psi)	90 bar (1305 psi)
Tiempo antes de liberar la carga	2,6 horas	10,7 horas	13,0 horas

Tabla 1. Tiempo que un sistema de CO₂ puede soportar estar fuera de operación.

Fiabilidad técnica: materiales familiares y durabilidad comprobada

Prácticas de soldadura familiares

Los evaporadores de 90 bar comúnmente se diseñan utilizando materiales XHP de hierro-cobre, que proporcionan a los técnicos:

- Métodos de soldadura (*brazing*) similares a los sistemas tradicionales de tubería de cobre
- Procesos de instalación y servicio simplificados
- Menos necesidad de experiencia especializada en soldadura de acero inoxidable

Esto reduce los costos de mano de obra y formación.

Resistencia estructural y resiliencia

Los materiales XHP de cobre-hierro están diseñados para:

- **Resistencia al desgaste:** la tubería XHP de cobre-hierro es una aleación CuFe₂P, designada como UNS C19400. Su composición química incluye cobre (Cu), hierro (Fe) y fósforo (P). Estos dos últimos elementos contribuyen a su mayor resistencia al desgaste (TriangleAlloy, 2025).

- **Resistencia a la corrosión a largo plazo:** la adición de cobre a los sistemas de acero o a las aleaciones mejora la resistencia a la corrosión microbiana (Liu et al., 2024).
- **Resiliencia estructural ante terremotos e impactos mecánicos:** las aleaciones de hierro-cobre diseñadas presentan mayor resistencia mecánica y dureza que el cobre puro (Dragomir et al., 2024), lo que puede mejorar la resistencia a la deformación y a los impactos mecánicos como los experimentados durante eventos sísmicos.
- **Longevidad superior a las expectativas típicas del ciclo de vida de un supermercado (estimación de ingeniería):** con base en las mejoras documentadas en cuanto a resistencia al desgaste, resistencia a la corrosión y resistencia mecánica de las aleaciones CuFe₂P (UNS C19400), los sistemas construidos con materiales XHP están diseñados para soportar vidas útiles comparables o potencialmente superiores al ciclo típico de 15-25 años de los sistemas de refrigeración en supermercados.

La durabilidad de estos materiales permite operar con confianza incluso en entornos exigentes.

Eliminación del enfriamiento de respaldo y de la energía de emergencia

Tradicionalmente, los sistemas de CO₂ requieren una unidad condensadora de respaldo para enfriar el tanque flash durante los cortes de energía o las tareas de mantenimiento, así como un generador de emergencia o un sistema de baterías de respaldo para operar el equipo auxiliar.

Ventajas del diseño de alta presión a 90 bar comparado con la presión estándar de 45-60 bar

- No se requiere una unidad condensadora de respaldo para condiciones ambientales de calor sostenido de 115 °F (46 °C) o menores
- No se requieren generadores de energía de emergencia para proteger la carga de refrigerante
- Ahorros en costos de CO₂ al proteger la carga y evitar la necesidad de conseguir CO₂ localmente, especialmente en zonas no urbanas
- Reducción potencial de fugas debido a la mayor resistencia general del sistema frente a sistemas tradicionales de 45 o 60 bar

Diseño de instalaciones simplificado

Impacto económico: ahorros en el ciclo de vida de 10 años

Al evaluar el costo inicial de un sistema de CO₂ a 90 bar con evaporadores de 90 bar, también es importante considerar que un sistema con estas clasificaciones de presión generará ahorros a largo plazo en comparación con los sistemas de 45-60 bar:

- **Inversión evitada en unidad condensadora de respaldo y generador de energía de emergencia:** el costo de una unidad condensadora de respaldo depende de las especificaciones, pero, a efectos de estimación, puede oscilar entre USD 1400 y USD 9000 (Restaurant Equipment World, 2026), y lo mismo ocurre con un generador de emergencia de 15 kW, con rangos amplios de USD 3800 a USD 7000 (BuyerZone, 2026).
- **Pérdida de carga evitada y costos de reemplazo de refrigerante:** considerando un precio promedio de mercado de USD 3,00 por libra de CO₂ (California Air

Resources Board, 2020) y una carga del sistema de 2000 libras, se podrían ahorrar USD 6000 más cargos de flete por cada evento de liberación de refrigerante.

- **Costos adicionales evitados relacionados con la imposibilidad de obtener grandes cantidades de CO₂ en una emergencia:** un análisis de mercado detallado señala que la cadena de suministro del refrigerante CO₂ (R-744) es menos madura y más restringida que la de los refrigerantes convencionales. La distribución depende de cilindros especializados de alta presión y de inventarios limitados en distribuidores regionales, lo que dificulta una entrega masiva rápida en situaciones de emergencia (PW Consulting Chemical & Energy Research Center, 2025).
- **Mayor tiempo en operación y preservación del producto (prevención de la pérdida de alimentos):** alrededor del 30 % de los alimentos en supermercados de EE. UU. se descarta, y los problemas de refrigeración son un factor clave detrás del deterioro de los productos perecederos antes de su venta. Además, existen costos ocultos como la interrupción en la productividad del personal cuando un sistema de refrigeración falla, ya que se desvían de sus funciones habituales (atender clientes o reabastecer estantes) hacia tareas más urgentes, o la pérdida de ventas. Un paro de cuatro horas en una sola vitrina puede significar cientos de dólares en ventas perdidas; una interrupción total de refrigeración en una tienda puede causar más de USD 10 000 en pérdidas de ventas (Robbins, 2025).
- **En cuanto a la pérdida real de alimentos, un análisis de inventarios minoristas de 2012 (para todo el inventario, no solo refrigerado)** encontró que el valor promedio total del inventario por tienda era de aproximadamente USD 289 648, con tiendas grandes y con alta proporción de perecederos manejando inventarios mucho mayores (~ USD 850 734 en valor de venta al público). Esta cantidad incluye productos no perecederos, pero los perecederos representarían una proporción significativa de esos totales en supermercados (Chiarello-Ebner, 2012).
- **Reducción de costos de instalación y servicio:** solo en cuotas de mantenimiento para la unidad condensadora de respaldo, considerando dos visitas al año para

mantenimiento preventivo, cuatro horas por visita y una tarifa por hora que va de ~ USD 75 a ~ USD 150 (Patel, 2025), en un periodo de 10 años se podrían ahorrar hasta USD 12 000, además del costo del generador, su combustible y su mantenimiento.

El rápido crecimiento de la demanda de sistemas R-744 conforme supermercados y almacenes en frío adoptan refrigerantes naturales podría incrementar la demanda más rápido de lo que la infraestructura de producción y distribución puede expandirse (ATMOsphere America y NASRC, 2023), afectando potencialmente la disponibilidad y el costo, lo que magnificaría aún más el retorno de inversión.

Estandarización de la industria y seguridad futura

Convertir los sistemas de 90 bar en el estándar de la industria garantiza:

- **Compatibilidad total con futuras actualizaciones de sistemas:** un enfoque en la clasificación de presión de 90 bar asegurará que tanto los fabricantes de componentes como de equipos completos puedan alinear el desarrollo de soluciones de mayor capacidad de presión, como compresores y acumuladores, entre otros ejemplos.
- **Intercambiabilidad de componentes:** a medida que 90 bar se convierta en el nuevo estándar, será más sencillo obtener componentes de distintos proveedores que cumplan con los requisitos del sistema. Esta clasificación de presión también está impulsando una alineación global en las especificaciones de equipos de CO₂. En Europa, muchos fabricantes históricamente han diseñado componentes de refrigeración con CO₂ alrededor de presiones de trabajo de ~ 60 bar para elementos como recipientes de líquido y partes relacionadas, reflejando prácticas comunes de la industria y el cumplimiento con los requisitos PED (isentra Ltd., s. f.). Hoy, 90 bar está emergiendo como el siguiente paso hacia la estandarización mundial. Esta armonización permite una mayor variedad de proveedores,

simplifica la homologación y ofrece mayor libertad en el diseño del sistema y la adquisición de equipos.

- **Cumplimiento con regulaciones de seguridad y ambientales en evolución:** en EE. UU., se espera que la Agencia de Protección Ambiental (EPA) continúe impulsando la transición hacia refrigerantes de bajo GWP. El CO₂, con un GWP de 1, es ampliamente considerado una solución a largo plazo “a prueba de regulaciones”. Diseñar alrededor de una clasificación de presión de 90 bar brinda además tranquilidad al asegurar compatibilidad con futuros requisitos de sistemas de alta presión y desarrollos de componentes.

Al implementar sistemas de CO₂, las organizaciones preparan sus operaciones para el futuro, mejoran la flexibilidad de los equipos y obtienen mayor certidumbre mediante la adopción de la clasificación de presión de 90 bar.

Importancia de los fabricantes certificados y establecidos

Invertir en un sistema de CO₂ de alta presión supone un compromiso significativo a largo plazo. Para maximizar la fiabilidad, la seguridad y el cumplimiento regulatorio, es fundamental obtener los equipos de un fabricante reconocido y establecido que pueda garantizar:

- Cumplimiento regulatorio: se requiere una organización estructurada para adherirse a los cambios más recientes de EPA, UL, ASHRAE, ASME y otras normas relevantes.
- Certificaciones UL y específicas por mercado: asegurando que el equipo cumpla con los requisitos de seguridad y desempeño en los mercados objetivo.
- Fiabilidad comprobada en campo y estándares de seguridad: validados mediante experiencia operativa y pruebas rigurosas.

- Garantía sólida y soporte técnico: proporcionando confianza en el servicio y la fiabilidad operativa a largo plazo.
- Materiales trazables e integridad de soldadura validada: confirmando la calidad de fabricación y la durabilidad a largo plazo.

La asociación con OEM confiables mitiga los riesgos operativos y de cumplimiento al tiempo que garantiza un rendimiento, una fiabilidad y una capacidad de mantenimiento óptimos a largo plazo de los activos de refrigeración de CO₂ de alta presión.

Conclusión

Los evaporadores de 90 bar suponen un avance estratégico en la tecnología de refrigeración con CO₂, ya que combinan resiliencia operativa, responsabilidad medioambiental y optimización del costo del ciclo de vida. Los evaporadores de 90 bar, junto con sistemas de 90 bar, permiten periodos de paro más largos (entre 2,6 y 13 horas), eliminan la necesidad de costosos sistemas de respaldo —que pueden costar hasta USD 9000— más aproximadamente USD 7000 adicionales por un generador de energía, sin incluir combustible y mantenimiento, y alrededor de USD 2560 en cuotas de mantenimiento para una unidad condensadora de respaldo en un periodo de 10 años.

Además, los evaporadores de 90 bar y los sistemas de CO₂ de alta presión en general ayudan a proteger la carga de refrigerante, que puede costar alrededor de USD 6000 por evento de pérdida, prevenir pérdidas de ventas que pueden alcanzar hasta USD 10 000 por hora de tiempo fuera de operación del sistema de refrigeración, evitar pérdidas de alimentos de hasta USD 850 734 en valor de venta al público y proporcionar una durabilidad mecánica superior.

A medida que la demanda de CO₂ aumenta, la disponibilidad se reduce y los objetivos de sostenibilidad se elevan, los evaporadores de 90 bar desempeñarán un papel central para garantizar la fiabilidad del sistema y el valor de la inversión a largo plazo. Los operadores con visión de futuro deberían considerar el diseño a 90 bar como el nuevo estándar base para sistemas de refrigeración con CO₂ preparados para el futuro, ya que les permite conservar sistemas basados en cobre y evitar las complejidades asociadas con el acero inoxidable.

	COSTO USD INICIAL + 10 AÑOS		
Costo del sistema de 45-60 bar	1 065 143	-6 %	Más barato comparado con sistema de alta presión
UC de respaldo	9000		
Mantenimiento para UC	12 000		
Generador de energía	7000		
Carga inicial de CO ₂ / 2000 lb	6000		
1 recarga de refrigerante	6000		
3 horas de ventas perdidas	30 000		
Pérdida de alimentos	850 734		
	1 988 877	75 %	Paquete completo es más costoso comparado con las inversiones de un sistema de alta presión
Costo del sistema de 80-90 bar	1 131 239		
Carga inicial de CO ₂ / 2000 lb	6000		
	1 137 239		

Tabla 2. Estimación de costos del sistema a partir de cotizaciones reales, incluyendo rack, gas cooler, evaporadores y vitrinas.

Independientemente del tamaño del sistema, con base en la evidencia presentada, se recomienda elegir sistemas de 90 bar en lugar de alternativas de menor presión, ya que los costos potenciales asociados con tiempos fuera de operación del sistema son mucho más significativos que la diferencia de costo de un sistema de 90 bar.

Agradecimientos

Quisiera agradecer a Jony Zangari, Ron Grabowski, Michael Lehtinen, Venkata Vayuvegula, Kevin Hoskins, Bruce Schneider y a todo el equipo de Krack por su destacado liderazgo, visión y asesoramiento técnico durante los últimos dos años. Su compromiso con el desarrollo de soluciones de refrigeración de CO₂ fiables y preparadas para el futuro ha sido fundamental para dar forma a las innovaciones y perspectivas presentadas en este documento.

Referencias

ATMOsphere America & NASRC. (2023). *U.S. demand for CO₂ refrigerant projected to quadruple by 2027*. NaturalRefrigerants.com. <https://naturalrefrigerants.com/news/atmo-america-nasrc-projects-u-s-demand-for-co2-refrigerant-to-quadruple-by-2027>

California Air Resources Board. (2020). Staff report: Initial statement of reasons for the proposed amendments to the prohibitions on use of certain hydrofluorocarbons in stationary refrigeration, chillers, aerosols-propellants, and foam end-uses regulation. California Environmental Protection Agency. <https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/barcu/regact/2020/hfc2020/isor.pdf>

Chiarello-Ebner, K. (2012, November 21). 2012 WholeFoods retailer survey. *WholeFoods Magazine*. <https://www.wholefoodsmagazine.com/articles/12888-2012-wholefoods-retailer-survey>

Dragomir, F., Manescu, T., & Tufisi, C. (2024). Influence of copper-iron (CuFe) and copper-tin (CuSn) alloys over mechanical strength properties in crimping process. *Vibroengineering Procedia*, 56, 163–168. <https://www.extrica.com/article/24508>

isentra Ltd. (s.f.). *CO₂ refrigeration products*. <https://www.isentra.net/products/>

Liu, Q., Li, P., Wu, B., Wei, Y., Jiang, H., Shen, J., & Liang, Q. (2024). Copper alloying improves the microbiologically influenced corrosion resistance of pipeline steel. *Coatings*, 14(7), 834. <https://doi.org/10.3390/coatings14070834>

Patel, J. (2025, June 18). How much to charge per hour for field services in 2026. *FieldCamp*. <https://fieldcamp.ai/blog/how-much-to-charge-per-hour/>

PW Consulting Chemical & Energy Research Center. (2025, June 23). *CO₂-based refrigerant market*. <https://pmarketresearch.com/chemi/co2-based-refrigerant-market/>

Restaurant Equipment World. (s. f.). *Remote condensing units*. REW Online. <https://www.rewonline.com/category/5190/Remote-Condensing-Units>

Robbins, A. (2025, March 11). How refrigeration outages make grocery stores lose more than just food. *Food Logistics*. <https://www.foodlogistics.com/warehousing/grocery-retail/article/22934766/axiom-cloud-how-refrigeration-outages-make-grocery-stores-lose-more-than-just-food>

Rosen, S. (s. f.). Home generators introduction. *BuyerZone*. <https://www.buyerzone.com/residential/home-generators/bg-home-generators-introduction/>

TriangleAlloy. (2025, January 8). *UNS C19400 (CuFe2P) copper iron alloy*. <https://trianglealloy.com/uns-c19400-cufe2p-copper-iron-alloy/>

U.S. Environmental Protection Agency. (2023a). *Technology transitions: HFC restrictions by sector*. <https://www.epa.gov/climate-hfcs-reduction/technology-transitions-hfc-restrictions-sector>

U.S. Environmental Protection Agency. (2023b). *Transitioning to low-GWP alternatives in commercial refrigeration*. <https://www.epa.gov/ozone-layer-protection/transitioning-low-gwp-alternatives-commercial-refrigeration>

