



# 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](mailto:info@iiar.org) • [www.iiar.org](http://www.iiar.org)



# Papel Blanco

## Refrigeración natural con propano R-290

Gildardo Yañez,  
Gerente de Capacitación Técnica y Aplicaciones, FB Group

### Resumen

*La transición global hacia refrigerantes de bajo impacto climático ha orientado a la industria de la refrigeración y el aire acondicionado hacia alternativas con potencial de calentamiento global (PCG) ultrabajo y potencial de agotamiento de ozono (PAO) nulo, conforme a los compromisos del Protocolo de Montreal y la Enmienda de Kigali. En este contexto, el propano (R-290) se consolida como un refrigerante natural con desempeño termodinámico sobresaliente, amplia disponibilidad y costos competitivos, que ofrece alta eficiencia energética y reducciones significativas de emisiones directas e indirectas en comparación con refrigerantes sintéticos de alto PCG.*

*Este documento presenta una revisión técnica integral del R-290, en la que se aborda su evolución como alternativa a los clorofluorocarbonos (CFC), los hidroclorofluorocarbonos (HCFC) y los hidrofluorocarbonos (HFC), así como sus principales ventajas ambientales y operativas. Se describen sus propiedades físico-químicas y termodinámicas (presión de vapor, punto de ebullición, densidad, calor latente de vaporización, límites de inflamabilidad, etc.) y se explica su relación con el diseño de sistemas compactos, de menor carga y de alto rendimiento.*

*Paralelamente, se analizan los desafíos críticos asociados a su inflamabilidad, incluidos los fundamentos del riesgo (límite inferior de inflamabilidad [LII]/límite superior de inflamabilidad [LSI], energía mínima de ignición y estratificación por densidad) y los criterios de seguridad aplicables para su mitigación: diseño de baja carga, componentes adecuados, eliminación de fuentes de ignición, detección de fugas, ventilación y distancias de seguridad.*

*Asimismo, se integra un marco normativo de referencia (EN 378, ISO 5149, IEC 60335-2-89/-2-40 y normas regionales), junto con criterios para el cálculo de la carga máxima permisible y consideraciones por tipo de sistema (expansión directa, condensador remoto y sistema indirecto con fluido secundario) y por categorías de ocupación.*

*Finalmente, se presenta un caso de estudio en México (CEDIS Hermosillo, Sonora), que demuestra la viabilidad técnica y operativa de las soluciones con R-290 bajo condiciones climáticas extremas, y destaca los beneficios en desempeño, seguridad por confinamiento del refrigerante y reducción de la huella de carbono. En conjunto, el documento concluye que el R-290 es una opción estratégica para la refrigeración sostenible, siempre que su implementación se base en una ingeniería rigurosa y una capacitación especializada.*



## Introducción

La evolución de los refrigerantes en la industria responde a la necesidad de conciliar el rendimiento térmico con la responsabilidad medioambiental. Desde mediados del siglo XX, el sector ha pasado de utilizar compuestos altamente eficientes pero dañinos para la capa de ozono, como los clorofluorocarbonos (CFC), a buscar alternativas más sostenibles, en respuesta a tratados internacionales que restringieron su uso.<sup>1</sup>

En esta búsqueda de soluciones ecológicas, los hidrocarburos (en particular, el propano, conocido como R-290) se han convertido en opciones viables, ya que presentan un bajo potencial de calentamiento global (PCG) y un potencial de agotamiento de ozono (PAO) nulo. No obstante, el uso de hidrocarburos introduce desafíos técnicos debido a su inflamabilidad, lo que exige un diseño riguroso de los sistemas y una capacitación especializada del personal. Este es el motivo del presente documento, en el que se exponen las características técnicas del R-290 para comprender su potencial y sus limitaciones en la implementación de sistemas seguros.

## Evolución de los refrigerantes

Durante las primeras décadas del siglo pasado, la industria de la refrigeración dependía de refrigerantes como el amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), apreciado por su elevada eficiencia, aunque limitado por su toxicidad y corrosividad (McLinden & Huber, 2020). La introducción de los CFC en la década de 1930 supuso una revolución tecnológica, ya que estos compuestos no eran inflamables ni tóxicos y ofrecían un desempeño termodinámico sobresaliente.

---

<sup>1</sup> Las enmiendas al Protocolo de Montreal, incluida la Enmienda de Kigali de 2016, establecieron metas para reducir el uso de los hidrofluorocarbonos (HFC) debido a su alto potencial de calentamiento global, lo que impulsó la búsqueda de alternativas más sostenibles.

Sin embargo, investigaciones realizadas en la década de 1970 (por las cuales sus autores recibieron el Premio Nobel de Química en 1995) demostraron que los CFC provocaban un deterioro significativo de la capa de ozono, lo que motivó la firma del Protocolo de Montreal en 1987 y la eliminación progresiva de los CFC y los hidroclorofluorocarbonos (HCFC), utilizados como sustancias de transición. Para sustituirlos, se desarrollaron los hidrofluorocarbonos (HFC), que preservaban la capa de ozono pero se caracterizaban pero poseían un PCG muy alto, por lo que contribuían significativamente al cambio climático.

La comunidad internacional, consciente del impacto climático de los HFC, adoptó en 2016 la Enmienda de Kigali al Protocolo de Montreal para fijar objetivos de reducción del consumo de estos gases.<sup>2</sup> La implementación de esta enmienda obligó a fabricantes y usuarios a buscar sustitutos con un PCG más bajo. Entre las soluciones emergentes destacan los refrigerantes naturales como el amoníaco, el dióxido de carbono (R-744) y los hidrocarburos (p. ej., R-290 y R-600a), así como las hidrofluoroolefinas (HFO), que combinan un bajo PCG con una buena eficiencia térmica.

La creciente disponibilidad de equipos y tecnologías asociadas a estos refrigerantes ha orientado a la industria hacia sistemas de refrigeración más respetuosos con el medio ambiente.

## **Beneficios ambientales**

Los hidrocarburos se consideran refrigerantes naturales porque se producen de forma espontánea en la naturaleza. En términos ambientales, su principal ventaja es un PCG extremadamente bajo. El propano (R-290) y el isobutano (R-600a) tienen un

---

<sup>2</sup> La Enmienda entró en vigor el 1 de enero de 2019.

PCG de 3 o menos, no contienen cloro ni bromo y, por tanto, tienen un potencial de agotamiento de ozono (PAO) nulo.



Figura 1. Elección del refrigerante: hidrocarburos frente a HFC en sistemas de refrigeración. Fuente: Gildardo Yañez.

Esta característica los alinea con los objetivos del Protocolo de Montreal y sus enmiendas, y los convierte en opciones atractivas frente a los HFC de alto PCG. Además de su bajo impacto ambiental directo, los hidrocarburos ofrecen una mayor eficiencia energética que muchos refrigerantes sintéticos. Su elevada entalpía de vaporización y sus excelentes propiedades de transferencia de calor permiten reducir la carga de refrigerante y el tamaño de los componentes, lo que se traduce en un menor consumo eléctrico y menores emisiones indirectas de CO<sub>2</sub> asociadas a la generación de energía.

Este rendimiento energético permite diseñar sistemas compactos que mantengan o mejoren la capacidad frigorífica respecto a los HFC a los que sustituyen.

### Desafíos técnicos y normativos

A pesar de sus ventajas, los hidrocarburos plantean desafíos significativos que exigen una gestión cuidadosa; el más relevante es su inflamabilidad. La Norma 34 de la American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) los clasifica como A3, lo que indica baja toxicidad pero alta inflamabilidad.<sup>3</sup>

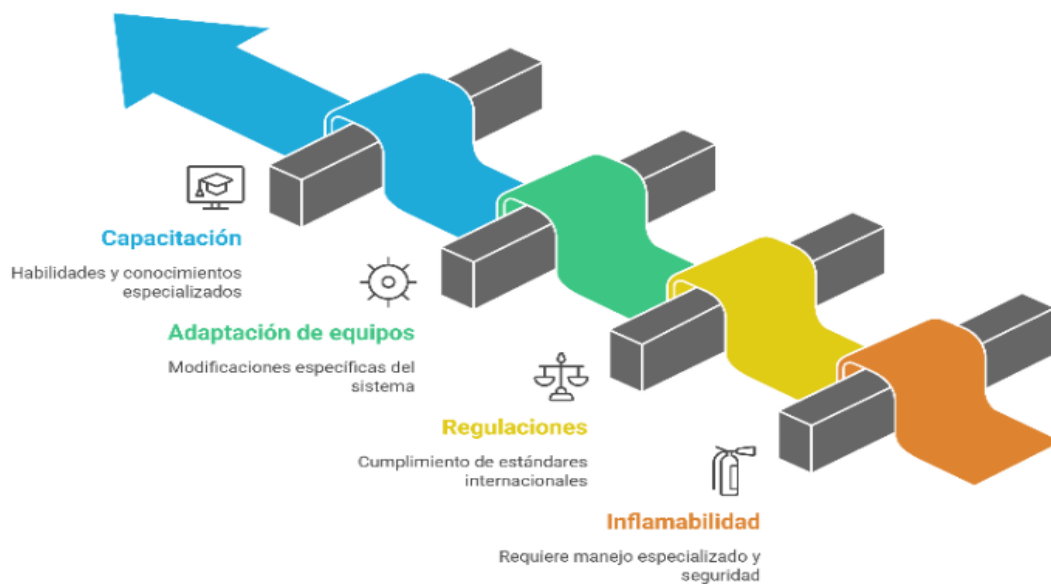


Figura 2. Desafíos en la adopción de hidrocarburos. Fuente: Gildardo Yañez.

Esta clasificación implica que los sistemas que emplean R-290 deben incorporar estrategias de mitigación de riesgo, como el diseño de equipos herméticos, la reducción al mínimo de la carga de refrigerante, la instalación de detectores de fugas y la ventilación forzada para mantener cualquier pérdida por debajo del límite inferior de inflamabilidad (LII). Normativas internacionales como la ISO 817 y la

<sup>3</sup> La Norma ASHRAE 34 es un estándar que establece un sistema de designación y clasificación de seguridad para gases refrigerantes, asignando números (como R-134a) una clasificación de seguridad según su toxicidad (A o B) e inflamabilidad (1, 2 o 3). Para más información sobre esta norma, consultar [www.ashrae.org](http://www.ashrae.org).

ASHRAE 15/34 definen límites de carga, distancias de seguridad y requisitos de diseño específicos para los refrigerantes A3, lo que obliga a los fabricantes a ajustar sus equipos y a los técnicos a recibir capacitación especializada.

El manejo seguro de hidrocarburos también requiere la adaptación de equipos y componentes. Aunque muchas tecnologías de refrigeración son compatibles con estos refrigerantes, su inflamabilidad exige realizar modificaciones: los compresores, los ventiladores y los componentes eléctricos deben ser a prueba de explosiones, y las válvulas de expansión deben ser compatibles con cargas más pequeñas. Es indispensable integrar sistemas de monitoreo continuo de fugas, junto con procedimientos de instalación y mantenimiento que eliminen las fuentes de ignición.

El éxito de la transición hacia los hidrocarburos depende, por tanto, no solo de las propiedades intrínsecas del refrigerante, sino también de la adecuada capacitación del personal y del cumplimiento de las normas de seguridad vigentes.

## **Refrigerante propano R-290**

El propano ( $C_3H_8$ ) es un hidrocarburo saturado que se obtiene como subproducto del refinado del gas natural y del petróleo. Cuando se utiliza como refrigerante natural, se denomina R-290. Según la clasificación ASHRAE 34, el propano se categoriza como A3, es decir, de baja toxicidad y alta inflamabilidad.

### *Propiedades y ventajas*

El R-290 presenta características termodinámicas superiores que contribuyen a su alta eficiencia energética. Su elevado calor latente de vaporización y sus excelentes propiedades de transferencia de calor permiten utilizar equipos más compactos y cargas de refrigerante significativamente menores en comparación con los refrigerantes tradicionales.

- Alta eficiencia energética: proporciona un rendimiento energético comparable o superior al de los HFC, lo que se traduce en menores costos operativos y un menor consumo de energía eléctrica.
- Bajo PCG (3) y PAO (0): impacto ambiental mínimo, que cumple con las regulaciones internacionales más estrictas, como el Protocolo de Montreal y la Regulación F-Gas de la Unión Europea.
- Temperaturas de descarga moderadas: reducen la relación de compresión del compresor y prolongan la vida útil del equipo.
- Disponibilidad y costo: el propano es un recurso abundante y su costo por kilogramo es generalmente inferior al de muchos refrigerantes sintéticos (Eurovent Certita Certification, 2023).

### *Descomposición ambiental del R-290 y ciclos biogeoquímicos*

Cuando se libera a la atmósfera, el R-290 no persiste durante largos periodos. Su estructura simple, compuesta únicamente por átomos de carbono e hidrógeno, carece de enlaces halogenados responsables de la estabilidad química de los CFC y HFC. La principal vía de degradación del propano en la troposfera es la reacción con radicales hidroxilo ( $\text{OH}\cdot$ ), conocidos como los “detergentes” atmosféricos, que oxidan rápidamente la molécula y generan productos finales como dióxido de carbono y agua.



Figura 3. Vida atmosférica del R-290 vs. refrigerantes sintéticos. Fuente: Gildardo Yañez.

Estos productos se incorporan de manera natural a los ciclos biogeoquímicos, de forma que el carbono liberado por la oxidación del propano se reintegra en los procesos de fotosíntesis y respiración, cerrando así un ciclo relativamente neutro en términos de carbono.

La velocidad de degradación del R-290 se traduce en una vida atmosférica breve, del orden de días, en contraste con los HFC, cuyos tiempos de residencia pueden abarcar décadas o siglos (Burkholder & Hodnebrog, 2022). Así, cualquier emisión accidental de propano tiene un efecto transitorio y localizado, lo que minimiza la contribución al calentamiento global.

Esta rápida descomposición, junto con su bajo PCG, explica por qué el R-290 se considera una pieza clave en la transición hacia sistemas de refrigeración sostenibles. En cambio, refrigerantes como el R-410A o el R-134a, con PCG del orden de miles, permanecen en la atmósfera durante largos periodos y ejercen un efecto climático acumulativo.

### *Ventajas ambientales del R-290 frente a los refrigerantes sintéticos*

La distinción entre el R-290 y los refrigerantes sintéticos se evidencia al comparar sus propiedades ambientales. Mientras que los HFC más utilizados, como el R-410A o el R-134a, presentan un PCG superior a 1000 y son químicamente estables, el propano tiene un PCG de 3 y se degrada en un periodo breve.

Esta diferencia implica que las emisiones de R-290 tienen un impacto climático casi nulo, mientras que las fugas de HFC contribuyen significativamente al efecto invernadero a escala global. Además, el R-290 no contiene cloro ni bromo, por lo que no participa en reacciones de destrucción de ozono. Por el contrario, los HCFC y los CFC tienen PAO elevados, lo que llevó, como se ha señalado, a su prohibición mediante el Protocolo de Montreal.

Otra ventaja medioambiental del R-290 es que sus productos de descomposición ( $\text{CO}_2$  y vapor de agua) se integran en los ciclos naturales sin introducir compuestos exógenos ni persistentes. En cambio, muchos refrigerantes sintéticos generan subproductos cuya interacción con la atmósfera puede producir gases de efecto invernadero de larga vida. La combinación de baja vida atmosférica, un PCG ultrabajo y la ausencia de PAO convierten al propano en un refrigerante de referencia para la refrigeración y el acondicionamiento de aire del futuro.

### *Propiedades físico-químicas de los hidrocarburos refrigerantes*

El diseño seguro de sistemas de refrigeración con hidrocarburos requiere conocer con precisión sus propiedades físico-químicas. Estos refrigerantes tienen un PCG muy bajo y un PAO nulo, lo que los convierte en alternativas atractivas a los HFC convencionales y los HFO.

Las características termodinámicas, como el punto de ebullición, la densidad relativa del gas o el calor latente de vaporización (Tabla 1), determinan tanto su aplicabilidad como las medidas de seguridad necesarias.

Característica	R-600	R-600a	R-290
Nombre químico	n-Butano	Iso-Butano	Propano
Fórmula química	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
Peso molecular	58.123	58.123	44.096
Presión de vapor @ 21.1 °C psig	16.9	31.1	109.3
Presión de vapor @ 54.4 °C psig	66.1	95.2	259.1
Punto de ebullición @ 1 atm °C	- 0.5	- 11.7	- 42.1
Temperatura de autoignición °C	405	543	450
Densidad relativa del gas @ 15.6 °C (aire = 1)	2.006	2.006	1.522
Densidad del líquido g/cm <sup>3</sup> a 21.1 °C	0.578	0.557	0.500
Relación de expansión (L → G) @ 1 atm, 21.1 °C	240.11	231.3	273.8
Flash Point °C	- 74	- 83	- 104
Calor de vaporización Kj/g @ P. eb.	385.7	365.7	425.7
Límites de inflamabilidad, gas en aire, % en volumen	1.9 → 8.5	1.8 → 8.4	2.2 → 9.5

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas de los refrigerantes hidrocarburos R-600, R-600a y R-290.

### *Punto de ebullición y presión de vapor*

El punto de ebullición normal (a 1 atm) es un indicador fundamental de las temperaturas de evaporación que un refrigerante puede alcanzar de manera eficiente en un sistema. Los diferentes puntos de ebullición de los hidrocarburos permiten su aplicación en un amplio rango de temperaturas:

R-600 (n-butano): -0,5°C. Aplicaciones de temperatura media a alta, como refrigeradores domésticos de bajo consumo y enfriadores de bebidas.

R-600a (isobutano): -11,7 °C. Para rangos de temperatura media y baja. Es el refrigerante más común en refrigeración doméstica (congeladores y refrigeradores combinados) debido a su eficiencia energética y presiones de operación moderadas.

También se usa en pequeños equipos comerciales, bombas de calor de alta temperatura y sistemas de calefacción. Las bombas de calor con R-600a pueden alcanzar temperaturas de suministro de hasta 90–95 °C.

R-290 (propano): -42,1° C. Para aplicaciones de media y baja temperatura, desde congelación profunda hasta sistemas de aire acondicionado de mayor capacidad. Ofrece un alto poder frigorífico volumétrico, buena eficiencia para aplicaciones comerciales e industriales.

La presión de vapor también es crítica; el R-290, con la presión de vapor más alta entre los tres, ofrece un mayor rendimiento en sistemas de expansión directa, pero requiere componentes diseñados para mayores presiones. Por el contrario, el R-600 y el R-600a son adecuados para sistemas de baja presión.

Característica	Punto de ebullición normal	Aplicaciones	Presión de vapor	Eficiencia
R-600 (n-Butano)	-0.5°C	Refrigeradores domésticos, enfriadores de bebidas	Baja	Buena
R-600a (Isobutano)	-11.7°C	Refrigeración doméstica, bombas de calor, calefacción	Baja	Muy buena
R-290 (Propano)	-42.1°C	Congelación profunda, aire acondicionado	Alta	Buena

Tabla 2. Comparativo de propiedades y aplicaciones de refrigerantes hidrocarburos.

Fuente: Gildardo Yañez.

## Densidad y expansión de hidrocarburos: implicaciones críticas para la seguridad y el diseño

Las propiedades termodinámicas de densidad y expansión volumétrica de los refrigerantes hidrocarburos resultan cruciales para el diseño seguro y operativo de cualquier sistema que los contenga. Comprender estas características permite anticipar y mitigar riesgos asociados a fugas, dimensionar correctamente los sistemas de contención y ventilación, y asegurar el cumplimiento de normativas estrictas.

Refrigerante	R-600	R-600a	R-290
Densidad relativa del gas @ 15.6 °C (aire = 1)	2.006	2.006	1.522
Densidad del líquido g/cm <sup>3</sup> a 21.1 °C	0.578	0.557	0.500
Relación de expansión (L → G) @ 1 atm, 21.1 °C	240.11	231.3	273.8
Flash Point °C	- 74	- 83	- 104
Calor de vaporización Kj/g @ P. eb.	385.7	365.7	425.7

Tabla 3. Densidad y expansión de los hidrocarburos.

### *Densidad del gas: comportamiento en fugas y estratificación*

Todos los refrigerantes hidrocarburos son más pesados que el aire, una característica física fundamental que determina su comportamiento en el ambiente en caso de una liberación accidental. Esta propiedad, medida por la densidad de vapor relativa (donde el aire tiene una densidad de 1), es esencial para el diseño de sistemas de seguridad:

- El R-600 y el R-600a son dos veces más pesados que el aire. Su elevada densidad les confiere una marcada tendencia a acumularse a nivel del suelo.
- El R-290 es aproximadamente un 50 % más pesado que el aire. Aunque su densidad es menor que la del butano, sigue representando un riesgo significativo de acumulación.

Estos refrigerantes presentan implicaciones de seguridad críticas porque, al ser más densos que el aire, no se disipan fácilmente hacia arriba. En cambio, tienden a fluir y acumularse en los puntos más bajos de una instalación o espacio cerrado, como sótanos, pozos, fosas, registros de cables y cualquier espacio confinado por debajo del nivel de la fuga. Esta estratificación puede crear “bolsas” de gas concentrado que, si alcanzan el LII, pueden explotar si entran en contacto con una fuente de ignición.

### *Requisitos normativos y diseño de seguridad*

Las normas de seguridad internacionales establecen medidas específicas para minimizar el riesgo asociado a la elevada densidad y expansión de los hidrocarburos. Entre las más importantes se encuentran:

- **Ubicación de detectores y ventilación:** los detectores de fugas deben colocarse cerca del suelo, en puntos donde el gas pueda acumularse. Se recomienda instalar sensores a nivel del suelo cuando el gas es tres o cuatro veces más pesado que el aire. Los puntos de muestreo deben situarse a nivel del suelo, y un detector correctamente colocado puede cubrir unos 36 m<sup>2</sup>. Estos dispositivos deben calibrarse para el refrigerante específico y configurar alarmas cuando la concentración alcance un porcentaje bajo del LII. Normas como la EN 378 y la IEC 60335-2-89 recomiendan activar alarmas y ventilación forzada cuando la concentración llegue al 20–25 % del LII para refrigerantes A3.
- **Ventilación y contención:** en salas de máquinas o espacios donde se instalen equipos con hidrocarburos, se requiere ventilación mecánica diseñada para mantener la sala en presión negativa respecto a las áreas adyacentes y equipada con motores antichispa. Este sistema debe contar con mandos de emergencia situados fuera de la sala para poder desconectarlo en caso de fuga. La ventilación natural solo es aceptable si está adecuadamente dimensionada; de lo contrario, es obligatorio un sistema mecánico independiente.

- Fuentes de ignición y aislamiento: las normas exigen eliminar todas las fuentes de ignición en las proximidades del refrigerante. Se recomienda aislar o sustituir componentes eléctricos susceptibles de producir chispas (interruptores, relés, contactores, ventiladores) y emplear equipos a prueba de explosión (clasificación Ex) cuando la carga de refrigerante supere 2,5 kg. Los drenajes, alcantarillas y conductos subterráneos deben sellarse para evitar que actúen como vías de propagación de gases pesados.
- Clasificación de áreas peligrosas: la densidad del gas se usa para definir zonas ATEX.<sup>4</sup> En áreas donde los vapores pueden alcanzar el rango inflamable se establece una zona 1 o zona 2 según la probabilidad de presencia de gas, y se instalan componentes eléctricos de seguridad intrínseca. Además, se especifican distancias mínimas respecto a entradas de sótanos, pozos o túneles y respecto a posibles focos de ignición, así como normas para la ubicación de tomas de aire de ventilación en la parte inferior de los recintos.

### *Consideraciones de seguridad: inflamabilidad y autoignición*

Aunque los hidrocarburos son altamente inflamables, su uso seguro en refrigeración depende de una comprensión profunda de sus propiedades de seguridad. La clasificación ASHRAE A3 indica baja toxicidad y alta inflamabilidad, y las temperaturas de autoignición son un factor clave.

---

<sup>4</sup> Atmosphères explosibles. Trad. atmósferas explosivas.

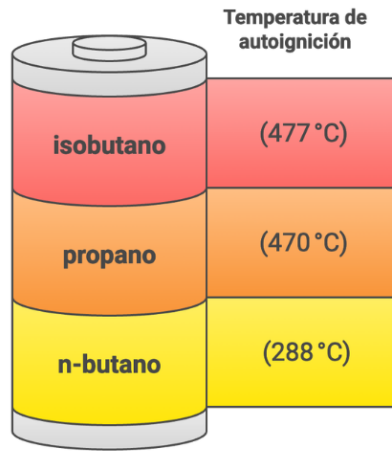


Figura 4. Inflamabilidad de los hidrocarburos. Fuente: Gildardo Yañez.

La temperatura de autoignición es la temperatura mínima a la que una sustancia combustible se enciende espontáneamente en el aire sin necesidad de una llama o chispa externa. Para los refrigerantes hidrocarburos, este valor es particularmente alto, lo que contribuye a su seguridad inherente en operaciones normales.

Estas temperaturas elevadas, significativamente superiores a las ambientales o de operación de los equipos, implican que los hidrocarburos no se encenderán por sí solos en condiciones normales. Para que ocurra una combustión, es indispensable una fuente de ignición activa y de alta energía, como una llama abierta, una chispa eléctrica intensa o superficies metálicas extremadamente calientes. Esto proporciona un margen de seguridad considerable, siempre que los sistemas se diseñen y mantengan según las normativas vigentes (p. ej., ISO 5149, EN 378).

### *Límites de inflamabilidad y gestión de riesgos*

Además del fenómeno de la autoignición, es fundamental considerar los límites de inflamabilidad de los refrigerantes inflamables: el LII y el límite superior de inflamabilidad (LSI). Estos parámetros definen el rango de concentración volumétrica

del vapor del refrigerante en el aire en el que puede producirse una ignición en presencia de una fuente de energía suficiente.

En el caso del R-290 (propano), el LII es aproximadamente del 2,1 % en volumen, mientras que el LSI alcanza cerca del 9,5 % en volumen. Por debajo del LII, la mezcla es demasiado pobre para arder; por encima del LSI, es demasiado rica para sostener la combustión.

Para gestionar el riesgo asociado a la inflamabilidad, las normativas internacionales, como la ASHRAE 15 y la EN 378, establecen límites máximos de carga de refrigerante según el volumen del espacio ocupado, el tipo de aplicación y la clasificación de seguridad del refrigerante (A3 en el caso del R-290). Este enfoque normativo se basa en el principio de seguridad por diseño, que prioriza la prevención de concentraciones peligrosas en caso de fuga.

Las principales estrategias de gestión del riesgo de inflamabilidad incluyen:

- Diseño de baja carga: minimización de la cantidad total de refrigerante contenida en el sistema, lo que reduce el potencial de alcanzar concentraciones inflamables en caso de fuga.
- Ventilación adecuada: diseño de sistemas de ventilación natural o mecánica que aseguren la dilución rápida del refrigerante liberado, manteniendo la concentración por debajo del LII.
- Detección de fugas: implementación de sistemas de detección que alerten de manera temprana y, según corresponda, activen medidas automáticas de mitigación, como ventilación forzada o paro del sistema.
- Componentes a prueba de ignición: uso de componentes eléctricos y electrónicos certificados, diseñados para evitar la generación de chispas o superficies calientes en zonas donde pudiera acumularse refrigerante inflamable.

### *Relación de expansión líquido-gas*

La relación de expansión de líquido a gas (L→G) constituye un parámetro crítico en el análisis de riesgos de los refrigerantes hidrocarburos. Este indicador expresa cuántas veces se incrementa el volumen de una masa determinada de refrigerante al pasar del estado líquido al estado gaseoso a presión atmosférica.

En refrigerantes como el R-290, esta transición implica un aumento volumétrico significativo, con consecuencias directas sobre la velocidad de dispersión, la estratificación del gas y la concentración alcanzada en espacios cerrados tras una fuga. Por ello, la relación L→G debe considerarse de forma explícita en los análisis de seguridad, el dimensionamiento de la ventilación y la determinación de la carga máxima admisible del sistema.

### *Ejemplo ilustrativo*

Para comprender la magnitud de la expansión, considere un sistema que contiene 10 kg de propano líquido. Con una densidad de 0,50 g/cm<sup>3</sup> (500 kg/m<sup>3</sup>), esa masa ocupa unos 20 litros de volumen líquido. Al liberar el contenido a presión atmosférica, la relación de expansión aproximada de 270:1 genera 5400 litros de gas. Si esa fuga ocurriera en una sala de 100 m<sup>3</sup> (100,000 litros), la concentración resultante sería del 5,4 %, es decir, dentro del rango inflamable del propano (1,7-9,5 %). En tal situación, los detectores de gas se activan de inmediato y se requiere una ventilación exhaustiva para diluir el gas por debajo del LII.

Este ejemplo ilustra por qué incluso pequeñas fugas de hidrocarburos pueden generar volúmenes peligrosamente grandes de gas y por qué las normas insisten en limitar la carga de refrigerante y disponer de sistemas de detección y ventilación adecuados.

### *Calor de vaporización: impacto en la eficiencia y seguridad*

El calor de vaporización, también conocido como entalpía de vaporización, es la cantidad de energía térmica necesaria para transformar una unidad de masa de una sustancia de líquido a gas a presión y temperatura constantes. Es un indicador clave de la eficiencia de un refrigerante, ya que determina cuánta energía puede absorber por kilogramo en el evaporador. El R-290 tiene el calor de vaporización más alto, con 425,7 kJ/kg. Esto significa que el R-290 puede absorber más energía térmica por unidad de masa que el R-600 (385,7 kJ/kg) y el R-600a (365,7 kJ/kg). Esta propiedad contribuye significativamente a su excelente eficiencia energética como refrigerante, ya que permite menores cargas de refrigerante para obtener la misma capacidad de enfriamiento, lo que también representa una ventaja en términos de seguridad.

### **Diseño de sistemas con hidrocarburos**

El diseño de un sistema de refrigeración depende en gran medida de las propiedades termodinámicas del refrigerante. Tres factores resultan cruciales: eficiencia energética, carga de refrigerante y dimensionamiento de componentes. El alto calor latente de vaporización del propano (alrededor de 428 kJ/kg) supera ampliamente al de refrigerantes sintéticos como el R-22 (232 kJ/kg) o el R-404A (200 kJ/kg; Sezen, 2025). Esto significa que cada kilogramo de R-290 puede absorber más energía durante la evaporación, lo que permite utilizar compresores y evaporadores de menor tamaño.

Estudios comparativos demuestran que la sustitución del R-404A por R-290 incrementa la capacidad de refrigeración en un 6,1 % y reduce el consumo eléctrico en un 6 %, lo que se traduce en una mejora del coeficiente de desempeño (COP, por sus siglas en inglés) del 12,4 % (Akmal et al., s. f.). Además, la alta entalpía de vaporización reduce el caudal másico necesario y facilita la disminución de la

carga de refrigerante, lo que supone una mejora en términos de seguridad en caso de fuga.

En cuanto a la carga de refrigerante, la eficiencia del R-290 permite operar con volúmenes notablemente menores. Según las directrices técnicas, la carga de propano necesaria en sistemas concebidos para el R-404A o el R-134a puede ser tan solo un 40 % de la original. En sistemas sencillos de expansión directa, la normativa limita la carga de R-290 a 150 g, lo que obliga a optimizar el diámetro de las tuberías, reducir la longitud del condensador y emplear evaporadores de menor volumen.

Estas restricciones no solo facilitan el cumplimiento de los límites de inflamabilidad, sino que también reducen el costo de los componentes y el impacto medioambiental en caso de fuga.

El dimensionamiento de los componentes está directamente vinculado al calor latente y a la densidad del refrigerante. Un calor de vaporización elevado permite diseñar evaporadores y condensadores con superficies de intercambio térmico más reducidas. Por otra parte, el alto rendimiento volumétrico del R-290 posibilita la utilización de compresores de menor desplazamiento sin sacrificar la capacidad frigorífica. El resultado son sistemas más compactos, energéticamente eficientes y con menor carga de refrigerante, a condición de que se cumplan estrictamente las medidas de seguridad que exige su inflamabilidad.

### *Punto de inflamación y temperatura de autoignición*

El punto de inflamación es la temperatura mínima a la que un líquido combustible produce suficientes vapores para formar una mezcla inflamable con el aire cerca de la superficie del líquido, capaz de encenderse en presencia de una fuente de ignición externa. Es crucial distinguirlo de la temperatura de autoignición, que es la temperatura a la que una sustancia se enciende espontáneamente sin una fuente externa.

Los puntos de inflamación de los hidrocarburos refrigerantes son extremadamente bajos. El n-butano (R-600) se inflama a aproximadamente  $-74\text{ }^{\circ}\text{C}$ , el isobutano (R-600a) a  $-83\text{ }^{\circ}\text{C}$  y el propano (R-290) a  $-104\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Esto implica que, incluso a temperaturas ambientales bajas, estos refrigerantes pueden liberar vapores inflamables; por lo tanto, deben eliminarse todas las fuentes de ignición en las proximidades de los equipos y durante el mantenimiento. Las temperaturas de autoignición son mucho más altas: aproximadamente  $287\text{ }^{\circ}\text{C}$  para el n-butano,  $477\text{ }^{\circ}\text{C}$  para el isobutano y  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$  para el propano, lo que proporciona un margen de seguridad considerable en condiciones normales de operación.

### *Límites de inflamabilidad en aire: fundamentos y aplicaciones de seguridad*

Los límites de inflamabilidad, el LII y el LSI, son parámetros críticos que definen el rango de concentraciones de una sustancia combustible (en este caso, un refrigerante hidrocarburo) en una mezcla con aire, dentro del cual una ignición puede provocar combustión o explosión. La comprensión de estos límites es fundamental para el diseño seguro de sistemas de refrigeración que utilizan hidrocarburos, la evaluación de riesgos y el establecimiento de protocolos de detección y ventilación adecuados. Estos valores son la base para determinar la seguridad operativa y de contención en instalaciones donde los hidrocarburos pueden estar presentes.

### *Límites de inflamabilidad comparativos para hidrocarburos*

La siguiente tabla presenta los límites de inflamabilidad en volumen para los refrigerantes hidrocarburos. Estos valores se determinan experimentalmente bajo condiciones controladas y son esenciales para la evaluación de riesgos.

Refrigerante	LII (% vol)	LSI (% vol)
R-600 (n-butano)	1,9	8,5
R-600a (isobutano)	1,8	8,4
R-290 (propano)	2,2	9,5

Tabla 4. Límites de inflamabilidad.

Las pequeñas variaciones entre estos refrigerantes se deben a sus diferencias en estructura molecular y proporciones de carbono e hidrógeno, lo que afecta su estequiometría de combustión y, por ende, su rango de inflamabilidad en el aire.

#### *Conceptos clave de inflamabilidad*

El LII es la concentración mínima de vapor de refrigerante en aire (expresada en porcentaje por volumen) por debajo de la cual la mezcla es demasiado pobre en combustible para propagar una llama. Si la concentración de hidrocarburo es inferior al LII, no habrá suficiente combustible para sostener la combustión, incluso en presencia de una fuente de ignición. Por ejemplo, para el R-290, si la concentración es inferior al 2,2 % en volumen, no se producirá una ignición. Este umbral es fundamental para el diseño de sistemas de ventilación que deben mantener las concentraciones por debajo de este nivel.

El LSI es la concentración máxima de vapor de refrigerante en aire, por encima de la cual la mezcla es demasiado “rica” en combustible y no hay suficiente oxígeno para que la combustión se propague. Si la concentración de hidrocarburos supera el LSI, el oxígeno disponible se agotará antes de que todo el combustible pueda quemarse. Para el R-290, esto ocurre por encima del 9,5 % en volumen. Aunque una mezcla por encima del LSI no arderá, esto no implica una situación segura, ya que una posterior dilución con aire puede hacer que la mezcla vuelva a estar en el rango inflamable.

### Determinación e interpretación para la seguridad operacional

La inflamabilidad de los refrigerantes se determina mediante ensayos estandarizados, como el método ASTM E681.<sup>5</sup> Estos valores son intrínsecos a cada sustancia y son fundamentales para la evaluación del riesgo.

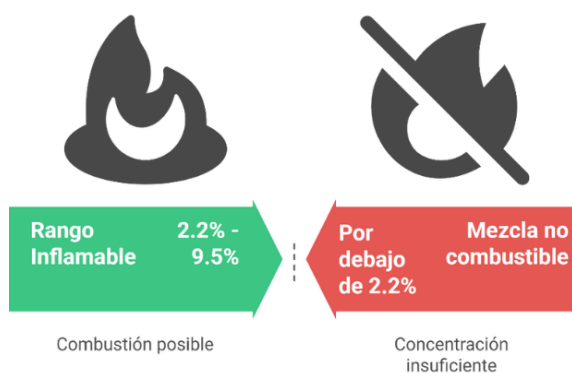


Figura 5. Inflamabilidad del R-290. Fuente: Gildardo Yañez.

El R-290 es inflamable entre 2.2 % y 9.5 % de concentración en volumen en aire en condiciones estándar. Esta definición se traduce en implicaciones de seguridad muy claras:

- Por debajo del 2,2 % (LII): mezcla no combustible. La concentración de refrigerante es insuficiente para que se propague una llama. En esta zona, no hay riesgo de ignición.
- Entre el 2.2 % y el 9,5 % (rango inflamable): combustión posible. Cualquier fuga que resulte en una concentración dentro de este rango, en presencia de una fuente de ignición (chispa, llama abierta, o superficie caliente), puede provocar un incendio o una explosión.

<sup>5</sup> Estándar internacional utilizado para determinar los límites de concentración de inflamabilidad de productos químicos en estado gaseoso o de vapor.

- Por encima del 9,5 % (LSI): mezcla sobresaturada. La concentración de refrigerante es excesiva y el oxígeno es limitado. La combustión no puede sostenerse. Sin embargo, si la fuga se diluye con aire fresco, la mezcla podría pasar a través del rango inflamable, lo que crearía un riesgo temporal pero significativo.

### *Energía mínima de ignición*

La energía mínima de ignición (EMI) es la cantidad de energía necesaria para encender una mezcla inflamable. Los hidrocarburos presentan valores extremadamente bajos: para el propano se sita en torno a 0,25 mJ, de modo que una simple chispa electrostática puede desencadenar la combustión si la concentración está dentro del rango inflamable. Este dato subraya la importancia de utilizar herramientas y equipos intrínsecamente seguros y de mantener una correcta conexión a tierra durante el mantenimiento, con el fin de evitar descargas electrostáticas.

### *Características técnicas de los equipos on R-290*

Los chillers diseñados específicamente para operar con R-290 incorporan características técnicas que optimizan el rendimiento y cumplen con los estándares de seguridad. Estos equipos representan la convergencia de eficiencia energética, sostenibilidad ambiental y seguridad operacional. La implementación del R-290 como refrigerante en sistemas de enfriamiento ha impulsado una innovación significativa en el diseño de equipos, que supera los desafíos inherentes a su inflamabilidad mediante ingeniería de precisión y componentes especializados.

### *Carga optimizada de refrigerante*

Los equipos modernos suelen utilizar cargas de 10 kg o menos y, en muchos casos, inferiores a 1 kg para unidades compactas, gracias a un diseño optimizado de

intercambiadores de calor compactos de alta eficiencia (como los de microcanal o de placas soldadas), sistemas que minimizan la carga en el circuito y configuraciones que reducen el volumen interno del circuito refrigerante.

Esta minimización de la carga es crucial para la seguridad, ya que permite que la concentración de refrigerante liberado en caso de fuga se mantenga por debajo del LII en espacios confinados, conforme a la normativa EN 378 y las directrices de la IEC 60335-2-40. Los sensores de alta precisión y las válvulas de expansión electrónicas también contribuyen a un control preciso de la carga.

## **Rendimiento comparativo: aplicación de baja temperatura**

El análisis comparativo riguroso del rendimiento termodinámico de distintos refrigerantes es una herramienta esencial para la selección óptima en el diseño de sistemas de refrigeración y aire acondicionado. Esta evaluación resulta crítica al considerar las crecientes demandas de eficiencia energética y la urgente necesidad de minimizar el impacto ambiental.

Los datos presentados a continuación se derivan de simulaciones realizadas con el software de referencia NIST CYCLE\_D 4.0.<sup>6</sup> Todas las condiciones operativas y de referencia están estandarizadas conforme a las directrices de la ASHRAE, lo que asegura una base objetiva y comparable para la evaluación de refrigerantes.<sup>7</sup>

---

<sup>6</sup> El NIST CYCLE\_D (oficialmente NIST Vapor Compression Cycle Design Program) es un software de simulación diseñado para modelar y analizar el rendimiento de sistemas de refrigeración por compresión de vapor. Es desarrollado por el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) de Estados Unidos.

<sup>7</sup> Para mayor referencia, véase <https://www.ashrae.org/technical-resources/ashrae-standards-and-guidelines>.

Este estudio se centra en aplicaciones de baja temperatura, un segmento donde la eficiencia y la elección del refrigerante tienen un impacto directo en los costos operativos y la huella de carbono.

### *Metodología de simulación y estándares*

El software NIST CYCLE\_D 4.0 permite simular el ciclo de compresión de vapor bajo diversas condiciones, a partir de las propiedades termodinámicas de los refrigerantes extraídas de la base de datos REFPROP.<sup>8</sup> Para esta comparación, se aplicó un ciclo ideal de compresión de vapor, que sirve de punto de referencia para entender el potencial máximo de cada refrigerante en un entorno controlado.

*Condiciones de operación: evaporador 7,2 °C (45 °F) / condensador 30 °C (86 °F)*

La simulación consideró un evaporador operando a 7,2 °C (45 °F) y un condensador a 30 °C (86 °F), valores representativos de la temperatura media en cámaras de conservación de alimentos, vitrinas y equipos de refrigeración autónomos. Se asumieron condiciones idealizadas: sin subenfriamiento a la salida del condensador, sin sobrecalentamiento a la entrada del compresor, sin pérdidas de presión en las líneas de succión y descarga, y con eficiencia isentrópica del compresor del 100%. Aunque estas hipótesis no reflejan las pérdidas inevitables de la operación real, permiten aislar las propiedades intrínsecas de cada refrigerante y sirven de referencia para la comparación.

---

<sup>8</sup> REFPROP (acrónimo de REference Fluid PROPERTIES) es una base de datos estándar del NIST utilizada para calcular las propiedades termodinámicas y de transporte de fluidos de importancia industrial y sus mezclas.

## Análisis detallado de los parámetros de rendimiento

Las simulaciones generaron valores cuantitativos para presión de evaporación, presión de condensación, relación de compresión, temperatura de descarga, capacidad volumétrica, COP y flujo másico. La Tabla 5 muestra que, en este escenario, el R-290 (propano) y el R-32 (difluorometano) destacan por su alta eficiencia, mientras que el R-404A (un refrigerante de alto PCG aún utilizado en muchos sistemas) presenta los valores más bajos de COP. El R-134a, aunque con menor impacto ambiental que el R-404A, presenta presiones de operación más bajas, pero una capacidad volumétrica reducida, lo que requiere compresores de mayor desplazamiento para obtener la misma capacidad frigorífica.

Parámetro	R-290	R-404A	R-134a	R-744	Unidad
Presión de evaporación	278	252	164	2589	kPa
Presión de condensación	1071	1367	770	7227	kPa
Relación de compresión	3,85	5,43	4,70	2,79	-
Temperatura de descarga	68	62	52	89	°C
Capacidad volumétrica	3580	3520	1890	12 500	kJ/m <sup>3</sup>
COP	4,12	3,42	3,89	3,95	-

Tabla 5. Comparación de parámetros termodinámicos y de desempeño.

Presión de evaporación (kPa): una presión de evaporación más alta indica un mayor potencial de extracción de calor a una temperatura dada. El R-290 (278 kPa) y el R-404A (252 kPa) operan a presiones similares y moderadas en el evaporador, lo que facilita el diseño de evaporadores y reduce el riesgo de entrada de aire en el sistema. El R-134a, por el contrario, muestra una presión significativamente más baja, lo que puede implicar un mayor volumen específico y, por ende, compresores más grandes. El R-744, con 2589 kPa, opera a presiones extremadamente altas, lo que exige un diseño robusto y especializado.

Presión de condensación (kPa): la presión de condensación está directamente relacionada con la temperatura de condensación y el punto crítico del refrigerante. El R-290 (1071 kPa) mantiene presiones moderadas, lo que permite el uso de componentes estándar. El R-404A (1367 kPa) requiere componentes de presión ligeramente superior. El R-744 (7227 kPa) opera en un régimen transcrito o con presiones subcríticas extremadamente elevadas, lo que exige componentes de alta resistencia a la presión, como tuberías, válvulas y compresores.

Relación de compresión: este parámetro ( $P_{\text{cond}}/P_{\text{evap}}$ ) es un indicador directo del trabajo que el compresor debe realizar y, por lo tanto, de su consumo energético y vida útil. Una relación de compresión más baja es deseable. El R-290 (3,85) presenta una relación de compresión favorable, similar o inferior a la de los HFC, lo que supone menos esfuerzo mecánico para el compresor y mayor eficiencia volumétrica. El R-744 tiene la relación más baja (2,79), lo cual es ventajoso, pero debe considerarse en el contexto de sus presiones absolutas mucho más altas.

Temperatura de descarga ( $^{\circ}\text{C}$ ): la temperatura de descarga del compresor es crítica para la durabilidad del lubricante y la integridad del compresor. Temperaturas excesivamente altas pueden degradar el aceite y reducir la vida útil del equipo. El R-290 ( $68^{\circ}\text{C}$ ) presenta una temperatura de descarga manejable, ligeramente superior a la del R-404A, pero dentro de los rangos operativos seguros para los compresores estándar. El R-744 tiene la temperatura de descarga más alta ( $89^{\circ}\text{C}$ ), por lo que puede requerir tecnologías de enfriamiento de descarga.

Capacidad volumétrica ( $\text{kJ}/\text{m}^3$ ): este valor indica la cantidad de calor que se puede transportar por unidad de volumen de refrigerante bombeado por el compresor. Una mayor capacidad volumétrica permite utilizar un compresor de menor desplazamiento para una capacidad de refrigeración determinada. El R-290 ( $3580 \text{ kJ}/\text{m}^3$ ) tiene una capacidad volumétrica superior, comparable a la del R-404A ( $3520 \text{ kJ}/\text{m}^3$ ), y supera ampliamente al R-134a ( $1890 \text{ kJ}/\text{m}^3$ ). Esto posibilita el uso de compresores de tamaño similar a los del R-404A. El R-744, con  $12\,500 \text{ kJ}/\text{m}^3$ , destaca

por su excepcional capacidad volumétrica, lo que lo hace ideal para sistemas muy compactos, a pesar de sus altas presiones.

Coeficiente de desempeño: el COP es la medida más importante de la eficiencia energética de un ciclo de refrigeración (relación entre la capacidad de refrigeración y el trabajo de compresión). Un COP más alto indica un sistema más eficiente. El R-290 se posiciona como líder en eficiencia con el COP más alto (4,12) entre todos los refrigerantes comparados, lo que se traduce en un consumo energético aproximadamente un 20 % menor que el del R-404A y superior al del R-134a y el R-744 en estas condiciones.

#### *Rendimiento comparativo: aplicación de temperatura media*

Las aplicaciones de temperatura media (-2 °C a +4 °C) representan el segmento más amplio y crítico de la refrigeración comercial a nivel mundial. Este rango de temperaturas es esencial para la conservación de una amplia variedad de productos perecederos, como vitrinas de productos frescos en supermercados, secciones de lácteos, carnes en carnicerías y la preservación de alimentos preparados en establecimientos de restauración. La eficiencia del refrigerante en este ámbito influye de manera directa y significativa en los costos operativos, la sostenibilidad ambiental y la calidad de los productos almacenados.

La elección adecuada de un refrigerante para estas aplicaciones influye no solo en el consumo energético y las emisiones de gases de efecto invernadero (directas e indirectas), sino también en la inversión inicial en equipos y la facilidad de mantenimiento a largo plazo. Por ello, un análisis comparativo riguroso de las propiedades termodinámicas es indispensable para tomar decisiones informadas.

*Condiciones de operación: evaporador 7,2 °C / condensador 30 °C*

Estas condiciones se han seleccionado para simular el escenario operativo más común en aplicaciones de refrigeración comercial de temperatura media. Una temperatura de evaporación de 7,2 °C (aproximadamente 45 °F) es típica para mantener temperaturas de cámara entre 0 °C y 5 °C, ideales para bebidas refrigeradas, frutas, verduras y productos lácteos en vitrinas y cámaras frigoríficas. La temperatura de condensación de 30 °C (86 °F) representa una condición ambiente moderada para condensadores enfriados por aire, común en muchos climas y configuraciones de supermercados o cocinas comerciales, lo que minimiza la influencia de picos extremos de temperatura ambiente.

Los cálculos presentados se basan en el software NIST CYCLE\_D 4.0. Se asumen condiciones idealizadas para una comparación directa y justa: sin subenfriamiento a la salida del condensador, sin sobrecalentamiento a la entrada del compresor, sin pérdidas de presión en línea, y con una eficiencia isentrópica del compresor del 100 %. Estas suposiciones permiten evaluar el rendimiento intrínseco de cada refrigerante en su máxima capacidad teórica.

*Datos comparativos de rendimiento*

A continuación, se presenta una tabla detallada con los parámetros de rendimiento clave para varios refrigerantes relevantes en aplicaciones de temperatura media. Los datos cuantitativos obtenidos bajo las condiciones estandarizadas proporcionan una base sólida para la evaluación.

Parámetro	R-290	R-404A	R-134a	R-32	Unidad
Presión de evaporación	622	516	349	1175	kPa
Presión de condensación	1071	1367	770	1883	kPa
Relación de compresión	1,72	2,65	2,21	1,60	-
Temperatura de descarga	41	46	39	52	°C
Capacidad volumétrica	4250	3890	2340	5120	kJ/m <sup>3</sup>
COP	8,95	6,85	7,92	9,12	-
Flujo másico (kg/TR · h)	7,2	13,5	11,8	8,9	kg/TR · h

Tabla 6. Comparación de parámetros termodinámicos y de desempeño.

Se observa que, en esta aplicación de temperatura media, el R-290 y el R-32 se destacan como líderes en eficiencia, mientras que el R-404A, un refrigerante de alto PCG tradicionalmente utilizado, muestra una eficiencia significativamente menor. La capacidad volumétrica, que determina el tamaño del compresor, varía notablemente; la del R-32 es la más alta.

#### *Ventajas del R-290 en aplicaciones de temperatura media*

En aplicaciones de temperatura media, el R-290 no solo mantiene sus ventajas, sino que las acentúa. Su COP de 8,95 es excepcionalmente alto, lo que se traduce en una eficiencia energética superior.

Esto significa que, por cada kilovatio de energía eléctrica consumida para operar el sistema de refrigeración, se transfieren casi 9 kilovatios de calor fuera del espacio refrigerado. Este nivel de eficiencia supone importantes ahorros en la factura eléctrica, lo que reduce los costos operativos a largo plazo para comercios y establecimientos.

La relación de compresión para el R-290 en estas condiciones es de tan solo 1,72. Esta baja relación conduce a temperaturas de descarga del compresor muy moderadas (41 °C). Las bajas temperaturas de descarga son críticas para la longevidad del sistema, ya que:

- Minimizan la degradación térmica del aceite lubricante, lo que prolonga su vida útil y mantiene su viscosidad óptima.
- Reducen el esfuerzo mecánico y térmico sobre los componentes internos del compresor, lo que se traduce en una mayor vida útil del equipo.
- Permiten operar el compresor dentro de un rango más seguro, incluso bajo variaciones de carga, algo común en entornos comerciales.

#### *Casos de uso específicos para el R-290*

El R-290 es ideal para una amplia gama de equipos de temperatura media, entre ellos:

- Vitrinas refrigeradas autónomas: aquellas que contienen su propio sistema de refrigeración, comunes en supermercados para la exposición de productos frescos y bebidas.
- Cámaras frigoríficas pequeñas y medianas: utilizadas en tiendas de conveniencia, restaurantes y cocinas industriales.
- Sistemas de racks centralizados pequeños: para sistemas que alimentan múltiples vitrinas en supermercados de formato reducido.

### *Comparación con refrigerantes modernos y aspectos clave*

Disponibilidad universal y costo: el R-290 es un producto petroquímico ampliamente disponible y producido a gran escala, lo que supone un costo significativamente menor (5-10 veces inferior por kilogramo) en comparación con refrigerantes sintéticos como el R-32. No depende de patentes de fabricantes específicos, lo que asegura el suministro.

Compatibilidad amplia: el R-290 es compatible con una variedad de aceites lubricantes tradicionales, incluidos los aceites minerales, aceites alquilbencenos y polioléster (POE). Esta versatilidad simplifica la conversión de sistemas existentes y reduce la complejidad logística para los técnicos de servicio.

Presiones de operación moderadas: a pesar de su alta capacidad volumétrica ( $4250 \text{ kJ/m}^3$ ), las presiones de operación del R-290 son comparables a las de otros refrigerantes comunes, lo que permite su uso con componentes estándar de la industria (compresores, válvulas, intercambiadores de calor) sin requerir equipos especializados de alta presión, a diferencia del  $\text{CO}_2$  (R-744) en baja temperatura.

Bajo flujo másico: el bajo flujo másico del R-290 ( $7,2 \text{ kg/TR} \cdot \text{h}$ ) es un beneficio importante. Permite el uso de tuberías de refrigerante de menor diámetro, lo que no solo reduce los costos de material e instalación, sino que también minimiza la carga total de refrigerante en el sistema. Esto es crucial dadas las normativas sobre cargas máximas permitidas para refrigerantes inflamables.



Figura 6. Beneficios del R-290. Fuente: Gildardo Yañez.

## Marco normativo y seguridad

El R-290 es un refrigerante con clasificación A3 (Norma ASHRAE 34), sin embargo, su uso seguro está bien establecido en la industria, con normativas como la EN 378 y el Código Internacional de Mecánica que establecen límites estrictos en la carga de refrigerante y requisitos de seguridad (ventilación, sensores, diseño a prueba de explosiones). La baja carga de refrigerante necesaria para el R-290 en aplicaciones de temperatura media facilita el cumplimiento de estas regulaciones.

### *Normativa*

DIN EN 378: Sistemas de refrigeración y bombas de calor. Esta norma europea establece los requisitos de seguridad en sistemas de refrigeración y bombas de calor. Se divide en cuatro partes principales:

1. Define los requisitos básicos, las clasificaciones de ocupación (p. ej., público general, acceso supervisado, acceso restringido) y los límites de carga de refrigerante basados en la toxicidad y la inflamabilidad. Para refrigerantes A3 como el R-290, impone límites de concentración y restricciones de uso en ciertas zonas.
2. Se centra en el diseño, construcción y ensayo de los componentes, con el fin de asegurar que los materiales y el equipo sean adecuados para las presiones y temperaturas de operación, y que soporten las propiedades del refrigerante.
3. Aborda los requisitos de instalación en sitio y la protección de personas, incluidos sistemas de ventilación, detectores de fugas y medidas de seguridad eléctrica.
4. Cubre la operación, el mantenimiento, la reparación y la recuperación de refrigerante, con el fin de garantizar prácticas seguras durante todo el ciclo de vida del sistema.
5. La adopción de la EN 378 es obligatoria en la Unión Europea y sirve como referencia clave en muchos otros países. Un ejemplo práctico es la exigencia de sistemas de ventilación mecánica en salas de máquinas que utilicen R-290, para mantener la concentración del refrigerante por debajo del LII en caso de fuga.

ISO 5149: Sistemas de refrigeración mecánica. La ISO 5149 es el estándar internacional equivalente a la EN 378, con el objetivo de armonizar los requisitos de seguridad y medioambientales a nivel global. También se compone de cuatro partes:

1. Principios generales, definiciones, clasificaciones y criterios de selección. Establece las bases para la identificación de riesgos y la elección de refrigerantes adecuados para distintas aplicaciones.
2. Diseño, construcción, ensayo, marcado y documentación. Detalla los procedimientos para asegurar que los equipos cumplan con los estándares de calidad y seguridad desde su fabricación.
3. Requisitos de instalación en sitio. Incluye aspectos como la ubicación de equipos, distancias de seguridad y la integración de sistemas de detección y prevención de fugas.
4. Operación, mantenimiento, reparación y recuperación. Proporciona directrices para el manejo seguro de los sistemas durante su vida útil, y enfatiza la importancia de la capacitación del personal.

Este estándar es fundamental para el comercio internacional de equipos de refrigeración, ya que asegura que los productos y las prácticas sean consistentes en diferentes regiones. Por ejemplo, define los requisitos de etiquetado y la información técnica que debe acompañar a un equipo que utilice R-290, en la que se indica su inflamabilidad.

NTC 6228: Norma técnica colombiana. La NTC 6228 es colombiana, pero su influencia se extiende a otros países de América Latina que la utilizan como base o referencia. Esta norma es vital porque considera las particularidades climáticas, geográficas y de infraestructura de la región. Establece:

1. Requisitos de seguridad para la instalación de sistemas de refrigeración y espacios donde estos se ubican, de modo que el diseño y las medidas de seguridad controlen los riesgos asociados a refrigerantes inflamables.
2. Normas para la operación, mantenimiento, reparación y recuperación de refrigerantes, incluida la gestión segura de sustancias inflamables durante el ciclo de vida del sistema.

3. Disposiciones ambientales para minimizar el impacto de los refrigerantes, que promueven la recuperación, reutilización y disposición adecuada para proteger el medio ambiente y cumplir con el Protocolo de Montreal.
4. Adopción y adaptación de normas internacionales ISO e integración con normativas europeas, con el fin de adecuar los estándares internacionales a la realidad colombiana para avanzar en la sostenibilidad y seguridad del sector RAC (refrigeración, aire acondicionado y bombas de calor).
5. Capacitación: subraya la necesidad de personal certificado para la manipulación e instalación de estos sistemas.

NCh3241:2017: Norma chilena de seguridad. La NCh3241:2017 es la normativa chilena que rige los requisitos de seguridad para sistemas de refrigeración y bombas de calor. Si bien se basa en estándares internacionales como la EN 378 y la ISO 5149, ha sido específicamente adaptada para el contexto y las condiciones de Chile.

Consideraciones:

1. Clasificación de refrigerantes según su inflamabilidad y toxicidad, con categorías que determinan los riesgos y medidas de seguridad necesarias para su manejo.
2. Buenas prácticas para el diseño, armado, instalación, operación y mantenimiento de sistemas de refrigeración y climatización que utilizan refrigerantes inflamables para minimizar riesgos.
3. Recomendaciones específicas para el marcado, construcción y aislamiento de tuberías que transportan refrigerantes inflamables para garantizar la seguridad y durabilidad.
4. Procedimientos para la evaluación y control de riesgos en sistemas con refrigerantes inflamables, incluidos aspectos de seguridad para personas, equipos y el entorno de trabajo.

Es fundamental entender que las normativas internacionales proporcionan una base sólida, pero cada país puede tener leyes, decretos o regulaciones adicionales que complementan o incluso superan estos estándares globales. Antes de diseñar, instalar o mantener cualquier sistema de refrigeración, especialmente los que emplean refrigerantes naturales como el R-290, es imprescindible consultar y verificar los requisitos legales y técnicos locales. El incumplimiento puede acarrear sanciones legales y económicas, además de comprometer la seguridad de las personas y la integridad de las instalaciones.

### *Consideraciones de seguridad*

La inflamabilidad del R-290 es su principal desafío, pero con el diseño, la instalación y el mantenimiento adecuados, los sistemas con R-290 son tan seguros como cualquier otro sistema de refrigeración. Se deben considerar los siguientes puntos:

- Carga de refrigerante: la normativa internacional, como la IEC 60335-2-89, limita la cantidad de R-290 que se puede cargar en sistemas para aplicaciones comerciales a 500 gramos.
- Ventilación: en espacios cerrados, se requiere una ventilación adecuada para dispersar rápidamente cualquier posible fuga de refrigerante por debajo del LII, que para el propano es aproximadamente del 2,1 % en volumen.
- Sistemas de detección de fugas: la instalación de detectores de fugas de propano, con alarmas y acciones automáticas (por ejemplo, activación de ventilación forzada o cierre de válvulas), es crucial para la seguridad.

### *Seguridad operacional*

La determinación de la carga máxima permisible de refrigerante en un sistema se rige por un estricto principio de seguridad por diseño. Este principio establece que la carga se calculará siempre tomando el menor valor resultante de las evaluaciones de

toxicidad, inflamabilidad y asfixia (privación de oxígeno). Este enfoque conservador asegura una protección robusta para los ocupantes y el personal de mantenimiento, ya que garantiza el sistema sea seguro incluso bajo condiciones de falla, como fugas.

Para cada refrigerante y aplicación, se calculan límites teóricos basados en su LII, el límite de exposición ocupacional (LEO) y el límite de privación de oxígeno (LPO). El valor de carga final adoptado no solo debe ser seguro para el límite más restrictivo, sino también compatible con los sistemas de detección y mitigación implementados. Por ejemplo, en el caso de refrigerantes inflamables, la carga debe ser tal que, ante una fuga total, la concentración resultante en el espacio ocupado no supere el 25 % del LII en áreas de alta ocupación.



Figura 7. Seguridad operacional. Fuente: Gildardo Yañez.

### *Ventaja de los refrigerantes de categoría A: amplio rango operacional*

Los refrigerantes de baja toxicidad, como el R-290 (A3), el R-600a (A3) y el R-32 (A2L), tienen valores de LEO significativamente altos, superiores a 400 ppm. Por tanto, en muchas aplicaciones, el riesgo principal no es la toxicidad, sino la inflamabilidad o la privación de oxígeno.

En sistemas en los que la inflamabilidad puede controlarse mediante un diseño adecuado (p. ej., equipos herméticos, sistemas indirectos o instalaciones al aire libre o bien ventiladas), estos refrigerantes permiten cargas más altas en comparación con los límites de toxicidad. La mayor tolerancia a la exposición de los ocupantes, gracias a sus altos valores de LEO, proporciona mayor flexibilidad de diseño, siempre que se cumplan rigurosamente las precauciones contra la ignición y se gestione la posible formación de atmósferas explosivas. Para el R-290, el límite de inflamabilidad suele ser el factor dominante en espacios cerrados.

## **Tipos de sistemas y consideraciones**

### *Sistema de expansión directa*

En los sistemas de expansión directa, el refrigerante circula directamente a través del evaporador, ubicado en el espacio o ambiente que se desea refrigerar. Este diseño permite una transferencia de calor altamente eficiente. Sin embargo, esto implica que una fuga de refrigerante puede liberar directamente R-290 (propano) inflamable en el área ocupada. Por ello, las normativas son muy estrictas e imponen límites de carga bajos (p. ej., hasta 150 g). Son comunes en refrigeradores domésticos, congeladores comerciales pequeños y ciertos equipos de aire acondicionado de baja carga. Para capacidades comerciales, se permiten 300 g por sistema de compresión si el refrigerador tiene puertas y 500 g si es una isla sin puertas, por sistema de compresión.

### Sistema directo con condensador remoto



Figura 8. Sistema directo con unidad condensadora remota. Fuente: Gildardo Yañez.

La unidad condensadora se instala en un lugar separado, como el exterior del edificio o en una sala de máquinas dedicada, mientras que el evaporador permanece en el espacio climatizado. Al ubicar el componente que contiene la mayor parte de la carga de refrigerante fuera de las áreas ocupadas, se minimiza considerablemente el riesgo de exposición a una fuga de R-290 en entornos sensibles. Aunque aún circula refrigerante primario en el evaporador dentro del espacio, la carga total de refrigerante en esa zona se reduce y la distancia de las líneas de refrigerante permite mayor flexibilidad en la ubicación del condensador, lo que facilita el cumplimiento de las normativas de seguridad, especialmente en aplicaciones comerciales como supermercados o cocinas industriales, donde se buscan soluciones más compactas y seguras que la expansión directa pura. La NTC 6228 y la ISO 5149-1 ofrecen guías específicas para la gestión de la carga en estos sistemas.

### *Sistema indirecto con fluido secundario*

Considerado el sistema más seguro para aplicaciones con refrigerantes inflamables, como el R-290, en áreas de alta ocupación, el sistema indirecto con fluido secundario aísla completamente el refrigerante primario. En este esquema, el R-290 se confina a un circuito cerrado y completamente sellado, donde su única función es enfriar un fluido secundario, como glicol o salmuera.

Este fluido secundario, no inflamable, se bombea a través de tuberías hacia los evaporadores ubicados en los espacios a refrigerar. De esta manera, el riesgo de una fuga de R-290 se elimina prácticamente.

Esta configuración es ideal para grandes centros comerciales, centros de distribución, hospitales, hoteles o cualquier edificación con alta densidad de personas, donde la seguridad es la máxima prioridad. Aunque implica mayor complejidad y un costo inicial ligeramente superior debido a la incorporación del circuito de fluido secundario y los intercambiadores de calor adicionales, estas desventajas se compensan con la tranquilidad operativa y el cumplimiento de las regulaciones más estrictas en cuanto a seguridad de refrigerantes inflamables. Por ello, esta configuración se ha convertido en la opción preferida para muchas aplicaciones críticas.

La eficiencia energética puede verse marginalmente afectada por la doble transferencia de calor, pero los avances tecnológicos en intercambiadores han minimizado este impacto.

## Categorías de ocupación según ubicación

### Área A - general (acceso no restringido)

Esta categoría abarca espacios de acceso público sin supervisión especializada permanente en relación con los sistemas de refrigeración. Se caracterizan por el alto tránsito de personas no capacitadas para actuar ante una emergencia de refrigeración y por el acceso irrestricto del público general.



Figura 9. Niveles de acceso y control de seguridad. Fuente: Gildardo Yañez.

Densidad y acceso: alta o muy alta densidad de ocupación y acceso no controlado por personal técnico.

Ejemplos:

- Grandes superficies comerciales y supermercados.
- Edificios de oficinas con climatización centralizada.
- Restaurantes, bares y cafeterías.

- Hoteles y alojamientos turísticos (áreas de habitaciones, vestíbulos).
- Áreas comunes de edificios residenciales (pasillos, ascensores, salones sociales).
- Instituciones educativas y hospitales (áreas públicas, salas de espera).

Restricciones de carga de R-290:

1. Límites muy bajos, a menudo inferiores a 500 gramos para R-290, en función de la ventilación y el tamaño del local.
2. Para sistemas de expansión directa, los límites de carga son extremadamente reducidos para evitar concentraciones peligrosas en caso de fuga.

### Área B - supervisada (acceso controlado y personal capacitado)

Esta categoría incluye zonas donde el acceso está parcialmente controlado y el personal presente durante las horas operativas está capacitado o informado sobre los procedimientos de emergencia relacionados con los sistemas de refrigeración. La supervisión puede no ser constante, pero existe una capacidad de respuesta organizada. Los límites de carga de refrigerante son más flexibles que en el Área A, pero aún requieren medidas de seguridad específicas para mitigar riesgos.

Densidad y acceso: ocupación moderada, con acceso controlado y supervisión activa o presencia de personal cualificado.

Ejemplos:

- Áreas de producción industrial o manufactura con personal técnico.
- Laboratorios con acceso restringido y personal científico.
- Cocinas industriales y cuartos fríos de restaurantes de gran escala.
- Salas de máquinas o cuartos de compresores con acceso exclusivo.
- Almacenes y depósitos frigoríficos con operaciones internas controladas.
- Centros de datos (data centers) con sistemas de climatización dedicados.

Restricciones de carga de R-290:

1. Límites de carga moderados, que permiten mayores cantidades que en el área A, pero aún con cálculos de concentración máxima.
2. Pueden oscilar entre 1,5 kg y 10 kg, en función de la ventilación, el volumen del local y la ubicación del equipo.
3. Se permite una mayor flexibilidad para los sistemas de expansión directa bajo estrictas condiciones de seguridad y ventilación.

### Área C - autorizada (acceso estrictamente restringido)

Corresponde a instalaciones industriales o comerciales donde el acceso está estrictamente restringido a personal autorizado y capacitado, con un alto nivel de control y procedimientos de seguridad rigurosos. Estas áreas están diseñadas para albergar grandes sistemas de refrigeración y permiten las mayores cargas de refrigerante, siempre que se implementen medidas de seguridad y monitoreo continuo para proteger al personal y al medio ambiente.

Densidad y acceso: baja ocupación, acceso solo para personal certificado y entrenado en protocolos de seguridad avanzados.

Ejemplos:

- Grandes plantas de procesamiento de alimentos y bebidas (lácteos, cárnicos).
- Almacenes frigoríficos industriales de gran volumen (cámaras de ultracongelación).
- Instalaciones petroquímicas y químicas con procesos de refrigeración críticos.
- Centros de distribución logística con grandes infraestructuras de frío.
- Generación de hielo a gran escala y pistas de patinaje (sistemas de amoníaco o grandes cargas de R-290).
- Instalaciones de investigación con requisitos específicos de temperatura.

Restricciones de carga de R-290:

- Cargas de refrigerante significativamente mayores, a menudo sin un límite superior preestablecido por la normativa, siempre que se cumplan todas las medidas de seguridad.
- Es común encontrar sistemas con más de 30 kilogramos de refrigerante en estas áreas.
- La seguridad se basa en la ingeniería del sistema y el monitoreo.

### *Determinación de la carga máxima de refrigerante*

El cálculo de la carga máxima permisible de refrigerante es un proceso técnico fundamental para la seguridad en el diseño e instalación de sistemas de refrigeración y aire acondicionado. Este análisis no solo garantiza la protección de la salud humana y el medio ambiente, sino que también previene daños materiales y riesgos de explosión o asfixia. El objetivo principal es asegurar que, incluso en el improbable caso de una fuga total del refrigerante en el espacio ocupado más pequeño de la instalación, las concentraciones resultantes en el aire se mantengan muy por debajo de los límites críticos establecidos por las normativas internacionales y nacionales.

La aplicación rigurosa de estas directrices es especialmente vital cuando se utilizan refrigerantes con características particulares, como los refrigerantes naturales inflamables (p. ej., R-290, propano), donde los riesgos asociados a la inflamabilidad y al posible desplazamiento de oxígeno deben evaluarse meticulosamente.

### *Cálculo del límite de concentración de refrigerante*

Las normativas internacionales y locales, como la ASHRAE 15 y la IEC 60335-2-89, establecen el límite de concentración de refrigerante (LCR) en un 25 % del LII. Este factor de seguridad de 4:1 se implementa para proporcionar un amplio margen de

seguridad, de modo que las concentraciones ambientales se mantengan muy por debajo del punto en que la ignición es posible.

$$\text{LCR} = 0,25 \times \text{LII}$$

Para el R-290, con un LII de 2,2 % en volumen (que equivale aproximadamente a 38 g/m<sup>3</sup> a 20 °C y 1 atm):

$$\text{LCRR-290} = 0,25 \times 38 \text{ g/m}^3 = 9,5 \text{ g/m}^3$$

Esto significa que la concentración máxima permitida de R-290 en un espacio ocupado, bajo condiciones normales, es de 9,5 g/m<sup>3</sup>. Este límite se utiliza para calcular la carga máxima de refrigerante permitida en un sistema que se ubicará en un espacio específico, ya que garantiza que, en el peor de los casos de una fuga completa, la concentración resultante no exceda este umbral crítico. Para otros refrigerantes, como el R-600a (LII ~ 1,8 % vol o 33 g/m<sup>3</sup>), el LCR sería  $0,25 \times 33 = 8,25 \text{ g/m}^3$ .

### *Sistemas de detección de fugas y niveles de alarma*

La instalación de detectores de gas hidrocarburo es obligatoria en muchas aplicaciones para garantizar la seguridad. Estos detectores se calibran cuidadosamente para activar alarmas en niveles específicos muy por debajo del LII, lo que permite una acción correctiva antes de que se alcance una condición peligrosa. Normativas como la EN 378-3 establecen la ubicación y los umbrales de alarma.

**20 %: primera alarma (alarma de precaución)**



Esta alarma se activa típicamente cuando se alcanza el 20 % del LII, lo que para el R-290 representa aproximadamente un 0,44 % en volumen o 7,6 g/m<sup>3</sup>. Su propósito es proporcionar una advertencia temprana de una fuga. Puede activarse la ventilación natural o de bajo nivel.

#### 40 %: alarma crítica (alarma de peligro)



Esta alarma se activa al 40 % del LII. Para el R-290, esto equivale aproximadamente a un 0,88 % en volumen o 15,2 g/m<sup>3</sup>. A este nivel, se considera que existe un riesgo potencial. Las acciones inmediatas incluyen la activación de la ventilación forzada de alta velocidad, el corte de energía a equipos que podrían ser fuentes de ignición (excepto aquellos esenciales para la seguridad, como la propia ventilación) y la evacuación del personal si es necesario. Estos sistemas garantizan que incluso una fuga considerable no alcance concentraciones peligrosas.

Fórmula base para el cálculo de la carga máxima:

Donde:

$$m_{max} = LCR \times V_{minimo,espacio}$$

- $m_{max}$  representa la carga máxima permisible de refrigerante en kilogramos (kg). Este es el valor que el sistema no debe exceder.
- El LCR es un valor crítico expresado en kilogramos por metro cúbico (kg/m<sup>3</sup>). Este límite se deriva de la evaluación de varios factores de seguridad, incluidos la toxicidad, el riesgo de desplazamiento de oxígeno y la inflamabilidad del refrigerante. Es el valor más restrictivo de todos los límites aplicables.
- $V_{minimo,espacio}$  es el volumen mínimo disponible para la dispersión del refrigerante en metros cúbicos (m<sup>3</sup>). Este volumen es crucial porque simula el escenario más

desfavorable: una fuga en el espacio más pequeño y con menos ventilación donde las personas podrían estar presentes.

Esta fórmula se utiliza para determinar cuánto refrigerante puede contenerse de manera segura en un sistema, teniendo en cuenta el volumen del espacio donde se encuentra la unidad evaporadora o cualquier componente del circuito de refrigeración que pueda liberar el refrigerante. El objetivo es mantener las concentraciones de refrigerante en el aire por debajo de un umbral seguro en caso de una fuga completa del sistema en el espacio más pequeño y desocupado.

## **Instalación segura de equipos con R-290: minimización de riesgos**

La implementación de sistemas de refrigeración que utilizan propano exige una rigurosa adhesión a normativas internacionales y locales. Estos criterios especifican la ubicación e instalación adecuadas y son fundamentales para asegurar la dispersión eficaz del refrigerante en caso de fuga, y, por tanto, minimizar los riesgos de ignición y explosión. La comprensión profunda de estas directrices es vital para garantizar la seguridad operativa y el cumplimiento legal.

### *Distancias de seguridad obligatorias para el R-290*

Los equipos *chiller* y las unidades condensadoras que operan con R-290 deben instalarse con separaciones mínimas predefinidas respecto a fuentes de ignición potenciales o elementos que puedan propiciar la acumulación de gas. Estas distancias están diseñadas para permitir una dilución rápida del propano en el aire por debajo de su LII, que para el propano es del 2,1 % en volumen.

Elemento	Distancia (m)
Posibles fuentes o focos de ignición	1,5
Interruptores y enchufes eléctricos	0,5
Motores con escobillas o que generan chispas	1,5
Registros, alcantarillas, desagües, etc.	1,5
Entradas a sótanos o espacios confinados	1,5

Tabla 7. Distancias de seguridad obligatorias para el R-290

Estas distancias se calculan meticulosamente considerando que la densidad del propano es 1,522 veces mayor que la del aire en condiciones estándar. Esto implica que, en caso de fuga, el propano tiende a descender y acumularse en zonas bajas, como el suelo o depresiones, lo que incrementa el riesgo de formación de bolsas de gas inflamable. No respetar estas separaciones puede provocar que una liberación accidental de refrigerante alcance una fuente de ignición antes de dispersarse a niveles seguros. La clasificación de áreas peligrosas según la IEC 60079-10-1, la Directiva ATEX (99/92/CE) o el Código NEC es fundamental para determinar las zonas de riesgo y aplicar las medidas de protección adecuadas.

### *Implicaciones de la densidad del R-290*

La mayor densidad del propano en comparación con el aire subraya la necesidad de un diseño de ventilación y ubicación que facilite su dispersión vertical y horizontal. En ambientes exteriores, la turbulencia del viento ayuda a diluirlo; sin embargo, en áreas protegidas o con poca circulación de aire, el gas puede permanecer a niveles bajos durante más tiempo. Por ello, se prohíbe la instalación de equipos con R-290 en sótanos o espacios donde la acumulación de gases pesados sea una preocupación.

### *Medidas complementarias de seguridad en la instalación*

Además de las distancias mínimas, varias condiciones físicas deben cumplirse para garantizar una instalación segura y eficaz de los sistemas con R-290, especialmente aquellos con cargas de refrigerante significativas (p. ej., > 10 kg). Estas medidas buscan controlar la trayectoria del gas en caso de fuga y prevenir la ignición.

### *Distancia perimetral y delimitación*

Las unidades externas, particularmente aquellas con cargas de refrigerante de hasta 30 kg, deben mantener al menos 1,5 metros de separación de cualquier muro, estructura, vegetación o cualquier objeto fijo que pueda obstruir la dispersión natural del gas. Esta distancia no solo es un margen de seguridad, sino que también define un “área de dispersión” esencial que debe estar libre de cualquier obstáculo que pueda crear una bolsa de gas. La norma EN 378-3:2016 detalla estas exigencias y enfatiza la importancia de un flujo de aire sin restricciones.

### *Base de gravilla para dispersión*

Se exige la creación de un perímetro de 1,5 metros alrededor de la unidad, cubierto con una capa de gravilla limpia y homogénea de al menos 0,25 metros de profundidad. Este lecho de gravilla actúa como una barrera porosa que facilita la dispersión horizontal controlada del propano en caso de fuga, ya que impide su acumulación directa en el suelo y promueve su evaporación gradual.

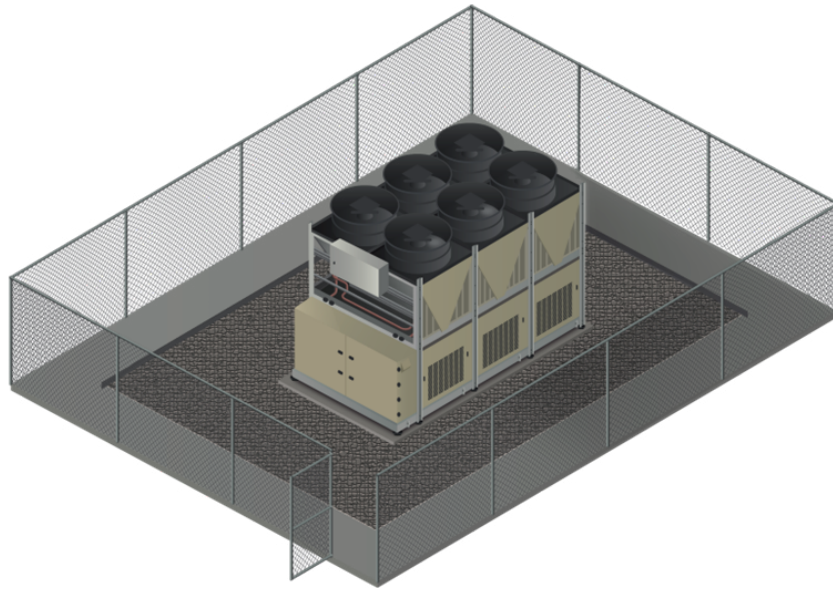


Figura 10. Base de gravilla perimetral para la dispersión segura de propano en unidades condensadoras. Fuente: Gildardo Yañez.

### *Ventilación natural optimizada*

El área de instalación debe estar completamente libre de obstrucciones que impidan la circulación natural del aire, tanto horizontal como verticalmente. La ubicación ideal es al aire libre, sin cerramientos parciales que puedan confinar el gas. En caso de no ser posible una ubicación completamente abierta, se deben asegurar espacios con ventilación cruzada permanente, con aberturas en lados opuestos del recinto. Esto garantiza una constante renovación del aire que previene la concentración de propano por encima del LII. Se recomienda la evaluación del sitio por ingenieros de HVAC especializados para asegurar un flujo de aire adecuado.

### *Sistemas de detección de fugas*

Para instalaciones con cargas mayores (especialmente en áreas semicerradas o con riesgos potenciales), la integración de detectores de gas inflamable es obligatoria.

Estos detectores, calibrados para el propano, deben estar ubicados a nivel del suelo y conectados a un sistema de alarma que active ventilación forzada y cierre automático de válvulas para mitigar la fuga, conforme a la IEC 60079-29-2.

### *Señalización y acceso restringido*

Todas las áreas donde se instalen equipos con R-290 deben estar claramente señalizadas con advertencias de “Refrigerante inflamable” y “Peligro de explosión”. El acceso a estas zonas debe restringirse a personal autorizado y debidamente capacitado. Esto previene la entrada de personal no cualificado que pueda introducir fuentes de ignición o desconozca los protocolos de seguridad.

El cumplimiento de estas medidas es crítico para la operación segura de los sistemas R-290 y forma parte integral de una gestión de riesgos exhaustiva, a menudo exigida por códigos de construcción y normativas de seguridad industrial como la NFPA 56.



Figura 11: Correcta señalización para refrigerante R-290 / Fuente: Gildardo Yañez

### *Requisitos para instalaciones de varios equipos con R-290*

La instalación de sistemas de refrigeración que emplean propano como refrigerante en configuraciones de unidades múltiples presenta desafíos específicos de seguridad que deben abordarse con un rigor aún mayor que las instalaciones individuales. Las normativas internacionales y nacionales, como la IEC 60335-2-89, la EN 378 y las directrices locales de seguridad industrial, establecen un marco estricto para garantizar la operación segura, lo que minimiza el riesgo de acumulación de refrigerante y la propagación de incendios o explosiones en caso de fuga.

### *Criterio de carga acumulada y zonas de riesgo*

Cuando múltiples unidades que contienen R-290 se instalan en la misma área o compartimiento técnico, las normativas exigen considerar la carga total acumulada de refrigerante para determinar los requisitos de separación, ventilación y seguridad adicionales aplicables. Este enfoque no solo suma las cargas nominales de cada equipo, sino que evalúa la potencial liberación conjunta de refrigerante en un evento catastrófico.

Este criterio conservador es fundamental porque reconoce que en un escenario de emergencia con fallas múltiples (por ejemplo, un evento sísmico o un impacto), varias unidades podrían liberar su carga de refrigerante simultáneamente. Esto daría lugar a concentraciones locales de propano significativamente más altas, que excederían con creces las calculadas para una sola unidad, lo que aumentaría exponencialmente el riesgo de alcanzar el LII y, por ende, el riesgo de ignición. La interacción de las nubes de vapor de propano de diferentes unidades puede crear zonas de riesgo superpuestas más extensas y complejas.

Para ilustrar, si se instalan tres *chillers*, cada uno con una carga de 30 kg de R-290 en un mismo espacio de maquinaria, la carga acumulada sería de 90 kg. Esta cifra de 90 kg, al superar los umbrales críticos de 70 kg, impone medidas de seguridad mucho

más rigurosas que las que se aplicarían a un solo *chiller* de 30 kg o a tres *chillers* instalados en áreas separadas.

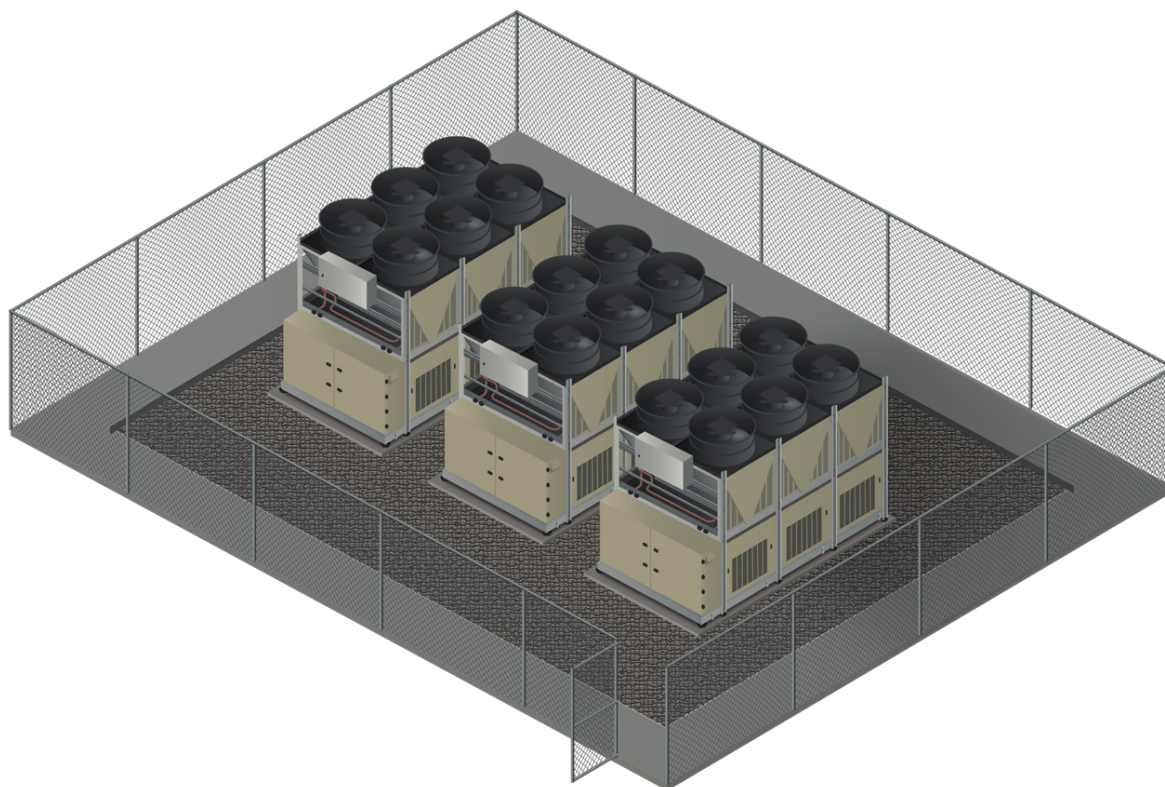


Figura 12. Con tres chillers instalados, las medidas de seguridad son más rigurosas. Fuente: Gildardo Yañez.

Umbral crítico: 70 kg de carga total acumulada

La carga acumulada de 70 kilogramos es un punto de inflexión crítico. Las normativas, como la EN 378-1, establecen que si la suma de las cargas de refrigerante de todas las unidades instaladas en un área común o sala de máquinas supera este valor, se activan requisitos adicionales de seguridad significativamente más estrictos, incluidas clasificaciones de zonas ATEX y la necesidad de sistemas de mitigación activa.

Origen del umbral: este límite se deriva de estudios de dispersión y riesgo de ignición, y busca un equilibrio entre la viabilidad técnica y la seguridad máxima, dado que una fuga total de esta magnitud puede generar una atmósfera explosiva de gran volumen.

Medidas adicionales: esto puede implicar la instalación de detectores de gas, sistemas de ventilación forzada con activación automática, componentes eléctricos y de control con certificación antideflagrante (Ex), así como el acceso restringido y controlado a la zona.

### *Separación entre unidades*

Cada unidad individual dentro de una instalación múltiple debe ubicarse a una distancia de al menos 3 metros de cualquier otra unidad que contenga refrigerante inflamable. Esta separación es crucial para varios propósitos:

Prevención de propagación: reduce drásticamente el riesgo de propagación de fuego de un equipo a otro en caso de ignición de una fuga, ya que crea un “cortafuegos” espacial.

Dilución de fugas: permite que una fuga se disperse y diluya antes de alcanzar una unidad adyacente, lo que minimiza la posibilidad de una reacción en cadena.

Zonas de seguridad individuales: asegura que las zonas de riesgo primarias alrededor de cada unidad no se superpongan indebidamente, permitiendo una mejor gestión de la dispersión de gases. La normativa EN 378-3 detalla criterios específicos para la distancia mínima entre aparatos que contienen refrigerantes inflamables.

Base de gravilla extendida y continua: los espacios intermedios entre las unidades no solo deben mantener la separación, sino que también deben estar cubiertos por el mismo relleno de gravilla especificado para las unidades individuales. Esto crea

una zona continua de dispersión segura alrededor y debajo de todo el conjunto de equipos.

Propósito de la gravilla: la capa de gravilla (idealmente de 0,25 metros de profundidad) facilita la dispersión horizontal del propano líquido y vaporizado, ya que actúa como una barrera porosa que impide su acumulación directa en el suelo y promueve su dilución. También ayuda a evitar la formación de charcos de propano líquido que podrían evaporarse lentamente y generar concentraciones peligrosas.

Mantenimiento: es esencial que esta base de gravilla se mantenga libre de vegetación, escombros u otros materiales que puedan reducir su porosidad o impedir la dispersión adecuada del gas.

Perímetro de seguridad ampliado para el conjunto: se requiere mantener una zona de seguridad perimetral de 3 metros alrededor del conjunto completo de unidades, es decir, no solo alrededor de cada unidad, sino del perímetro exterior total que engloba a todas las unidades instaladas. Esta área debe cumplir con las siguientes condiciones estrictas:

Libre de fuentes de ignición: excluye cualquier componente o actividad que pueda generar una chispa, llama abierta o superficie caliente, incluidos equipos eléctricos no certificados, vehículos, soldaduras, o almacenamiento de materiales inflamables.

Ventilación natural: debe estar diseñada para permitir la máxima ventilación natural, sin obstáculos (muros, cercas densas, vegetación alta) que puedan confinar el gas.

Superficie cubierta: toda la superficie dentro de este perímetro ampliado debe estar cubierta por la base de gravilla, de modo que se asegure una dispersión uniforme.

Acceso controlado: es indispensable implementar controles de acceso para evitar que personal no autorizado o sin conocimiento de los riesgos ingrese a esta zona.

## Caso de estudio: CEDIS Hermosillo, Sonora

En el centro de distribución (CEDIS) de gran escala, especializado en productos perecederos, ubicado en Hermosillo, Sonora, se implementó exitosamente un sistema de refrigeración avanzado utilizando R-290 (véase la Figura 13). Este proyecto sirvió como un caso de estudio crucial que demuestra la viabilidad técnica, la eficiencia operativa y la seguridad de esta tecnología de refrigeración natural, incluso bajo las condiciones climáticas más exigentes.



Figura 13. Caso de estudio CEDIS Hermosillo. Fuente: Gildardo Yañez.

La implementación incluyó la instalación de 2 unidades *chiller* modulares, cada una con una capacidad de 30 TR (Figura 14), lo que proporcionó redundancia y flexibilidad operativa. El diseño se enfocó en la optimización de la carga de

refrigerante; cada unidad cuenta con tres circuitos de refrigeración que operan con 10 kg de R-290.

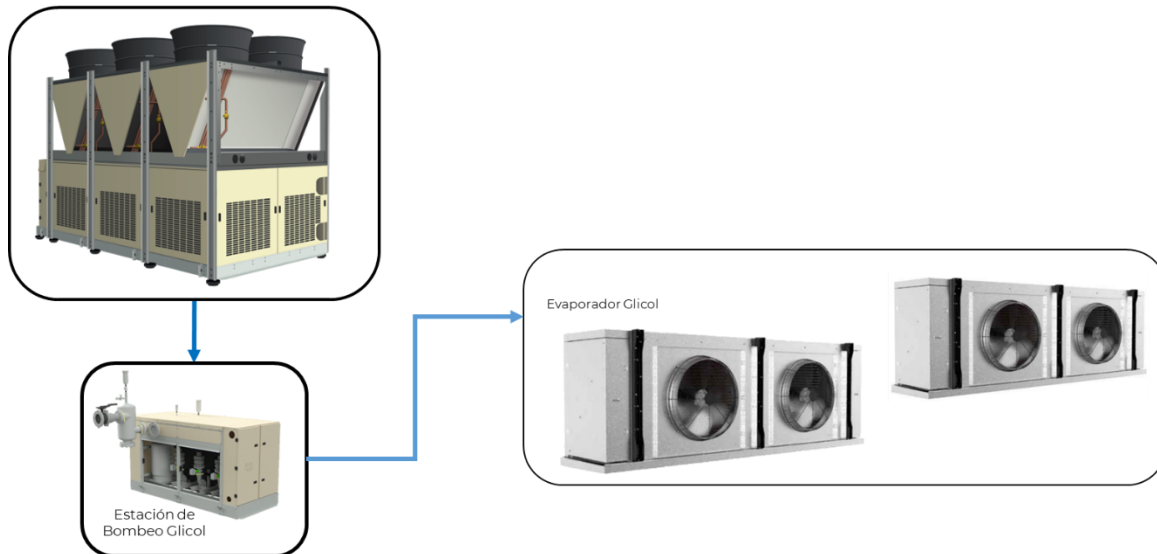


Figura 14. Arquitectura del sistema de refrigeración con chillers modulares con R-290 y distribución por circuito de glicol. Fuente: Gildardo Yañez.

### *Desafíos climáticos y soluciones*

Hermosillo, Sonora, presenta uno de los climas más extremos de México para sistemas de refrigeración, caracterizado por veranos extremadamente calurosos y secos. A lo largo del año, la temperatura ambiente suele variar entre 8 °C y 40 °C, con picos excepcionales que han alcanzado hasta 46,5 °C en el verano de 2019. Estas condiciones exigentes someten los sistemas de refrigeración a un esfuerzo térmico considerable. El R-290 ha demostrado su capacidad para mantener una eficiencia operativa superior (alto COP) y una capacidad de enfriamiento estable, incluso bajo temperaturas extremas de condensación (hasta 55 °C en el lado de alta presión), lo que supera el rendimiento de los sistemas convencionales de HFC en condiciones similares.

### *Configuración del sistema indirecto con glicol*

La instalación utiliza dos unidades *chiller* con R-290 que operan en un sistema indirecto con un circuito de glicol como fluido secundario. Esta configuración es fundamental para garantizar la seguridad. El R-290, al ser un refrigerante inflamable, se confina completamente en el área de equipos, designada como “Área C - autorizada” bajo estrictas normativas de seguridad (similar a la clasificación ATEX para zonas peligrosas).

El glicol, por su parte, se encarga de distribuir la capacidad de enfriamiento a través de todo el CEDIS mediante un circuito cerrado, lo que elimina cualquier riesgo de fuga de R-290 en las zonas de almacenamiento de productos o áreas de personal.

El sistema indirecto permite utilizar cargas mayores de R-290 en las unidades *chiller* sin las restricciones impuestas por la ocupación de espacios refrigerados, siempre y cuando el área de equipos cumpla con las especificaciones de seguridad.

Seguridad mejorada y cumplimiento normativo: todo el refrigerante inflamable permanece en la zona clasificada, y los *chillers* cuentan con detección continua de fugas, además de estar instalados en el exterior. Esto asegura la máxima seguridad operativa en todo momento.

Eficiencia operativa en condensación extrema: el R-290 mantiene un COP superior incluso a temperaturas de condensación elevadas (50-55 °C), lo que se traduce en menores costos energéticos y una operación más fiable en climas cálidos.

Flexibilidad y mantenimiento: la modularidad del sistema y el uso de componentes estándar facilitan el mantenimiento y permiten una rápida adaptación a futuras expansiones o cambios en la demanda de refrigeración.

### Resultados y beneficios clave

La implementación de este sistema R-290 en el CEDIS de Hermosillo arrojó los siguientes resultados:

- Reducción de la huella de carbono: al utilizar un refrigerante con un PCG de 3 (comparado con miles para los HFC), el impacto ambiental se minimizó drásticamente.
- Alta fiabilidad operativa: el sistema mantiene una operación estable y eficiente durante los picos de temperatura más altos, sin interrupciones ni pérdida de capacidad.
- Cumplimiento con regulaciones futuras: posiciona al CEDIS a la vanguardia en el cumplimiento de las normativas ambientales más estrictas para refrigerantes.
- Sistema constructivo con mejor costo: materiales de instalación más económicos (p. ej., tubería de PVC frente a cobre); ultrabaja carga de refrigerante: 60 kg de R-290 frente a 700 kg de R-449A.



Figura 15. Comparación de costos de proyectos con R-290 frente a R-449A. Fuente: Gildardo Yañez.

- Costo de equipo de refrigeración: inversión inicial ligeramente mayor en sistemas de refrigeración con R-290 en comparación con sistemas de refrigerante sintético.

- Ahorro energético: reducción del consumo energético que compensa la inversión inicial (el sistema en R-449A consume 4,25 % más que el sistema en R-290).

## Conclusiones

El propano R-290 es un refrigerante natural altamente eficiente, con un PCG extremadamente bajo y un PAO nulo. Esto lo posiciona como una alternativa favorable frente a los refrigerantes sintéticos HFC y HFO, ya que cumple con las normativas ambientales internacionales más estrictas y contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

Aunque el R-290 presenta ventajas significativas en eficiencia energética, costo y compatibilidad con materiales, su principal desafío es su alta inflamabilidad. Por ello, su uso requiere estrictas normas de seguridad, un diseño adecuado, capacitación técnica especializada y sistemas de detección y ventilación que minimicen los riesgos operacionales, de modo que se garantice un manejo seguro en aplicaciones comerciales e industriales. La normativa internacional y las buenas prácticas en el diseño e instalación de sistemas con R-290 establecen límites rigurosos para la carga máxima de refrigerante, distancias de seguridad y medidas específicas para las instalaciones donde estarán los equipos. Estas regulaciones aseguran una operación segura y eficiente y permiten la implementación exitosa del R-290 en sistemas modernos de refrigeración, incluso en proyectos industriales a gran escala, como lo demuestra el caso de estudio en México.

## Referencias

Akmal, M., Sumeru, K., Tohir, T., Hikmat, Y. P., Nuryati, N., & Sulaimon, S. (s. f.). Energy and exergy performance of R290 as a substitute for R404A in freezers: Experimental investigation. *Jurnal Polimesin*.

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2022). *ANSI/ASHRAE Standard 34-2022: Designation and safety classification of refrigerants*.

Burkholder, J. B., & Hodnebrog, Ø. (2022). Annex: Summary of abundances, lifetimes, ODPs, REs, GWPs, and GTPs. En World Meteorological Organization, *Scientific assessment of ozone depletion: 2022*.

Comisión Electrotécnica Internacional. (s. f.). *IEC 60335-2-40*.

Comisión Electrotécnica Internacional. (s. f.). *IEC 60335-2-89*.

Comité Europeo de Normalización. (s. f.). EN 378: *Sistemas de refrigeración y bombas de calor*.

Eurovent Certita Certification. (2023, 26 de septiembre). *El propano: ¿El nuevo héroe del net zero?* <https://www.eurovent-certification.com/es/category/article/propane-the-new-hero-of-net-zero>

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (s. f.). *NTC 6228*.

Instituto Nacional de Normalización. (2017). *NCh3241:2017: Norma chilena de seguridad*.

McLinden, M. O., & Huber, M. L. (2020). (R)Evolution of refrigerants. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 65(9), 4176–4193. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.0c00338>

National Fire Protection Association. (s. f.). NFPA 56: Standard for fire and explosion prevention during cleaning and purging of flammable gas piping systems.

Organización Internacional de Normalización. (s. f.). ISO 5149: *Sistemas de refrigeración mecánica*.

Secretaría de Energía. (s. f.). *NOM-001-SEDE*.

Sezen, K. (2025). Thermodynamic insights and comparative evaluation of R22, R410A, R32, R290, and R1234ze(E) in air source heat pump systems: A theoretical study. *International Journal of Energy Studies*, 10(2), 332–366.

Yañez Angli, G. (2022). *Manejo seguro de hidrocarburos en el sector refrigeración y aire acondicionado*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit; Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial.

Yañez Angli, G. (2025). Manual especializado de buenas prácticas en el manejo de hidrocarburos para el sector refrigeración. Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial.



