

Informe sobre pasos inmediatos  
para un futuro sostenible

# Acelerando la transición hacia contenedores refrigerados respetuosos con el clima y el ambiente



# Apéndices

Como empresa de propiedad federal, la GIZ apoya al Gobierno alemán en el logro de sus objetivos en el campo de la cooperación internacional para el desarrollo sostenible.

**Publicado por:**

Kuehne Climate Center  
Grosser Grasbrook 17  
20457 Hamburgo  
Alemania  
Correo-E: [climate@kuehne-foundation.org](mailto:climate@kuehne-foundation.org)  
*Kuehne Climate Center*

**Programa/descripción del proyecto:**

Contenedores Refrigerados Ecológicos (Greener Reefers)/Proklima

**Responsable:**

Kirsten Orschulok, Líder del Proyecto Contenedores Refrigerados Ecológicos (Greener Reefers)

**Autores y recopilación de datos:**

Philipp Denzinger, Kirsten Orschulok, Lydia Ondraczek,  
Adrian Fillmann (GIZ), Manuel Enrique Salas Salazar,  
Mark Major (Kuehne Climate Center)

**Apoyo adicional y revisión:**

Marius Bararu, Dan Timofte, Holger König, Tizian Pfeiffer

**Traducción al español:** Global Linguistics

**Apoyo adicional y revisión en español:**

Andrés Domian Astorga, Rosa Vásquez Rodríguez, Daniela Florez Galvis

**Diseño:** Kaufmann Kommunikation

**Fotografía/fuentes:**

©GIZ Proklima, Philipp Denzinger

**Enlaces URL:**

Esta publicación contiene enlaces a sitios web externos. La responsabilidad del contenido de los sitios externos enumerados siempre recae en sus respectivos editores. En el momento de la primera publicación de los enlaces a estas páginas, la GIZ verificó el contenido de terceros para determinar si podía dar lugar a responsabilidad civil o penal. Sin embargo, no se puede esperar razonablemente una comprobación constante de los enlaces a sitios externos sin una indicación concreta de una violación de los derechos. Si la propia GIZ tiene conocimiento o es notificado por un tercero de que un sitio externo al que ha proporcionado un enlace da lugar a responsabilidad civil o penal, eliminará inmediatamente el enlace a este sitio. La GIZ se desvincula expresamente de dicho contenido.

**En nombre de:**

Ministerio Federal de Medio Ambiente, Conservación de la Naturaleza, Seguridad Nuclear y Protección del Consumidor de Alemania (BMUV)  
KI II División 7 Financiamiento Climático Internacional, Iniciativa Climática Internacional (IKI)  
11055 Berlín, Alemania  
T: +49 30 18 305-0  
F: +49 30 18 305-4375  
E: [KI117@bmu.bund.de](mailto:KI117@bmu.bund.de)  
I: [www.bmu.de](http://www.bmu.de)

GIZ es responsable por el contenido de esta publicación.  
Eschborn, 2025

# Tabla de Contenidos

<b>Tabla de Contenidos</b>	II	<b>6</b>	<b>El camino a seguir:</b>	
<b>Lista de figuras</b>	III		<b>ampliar la adopción del R290</b>	<b>40</b>
<b>Lista de tablas</b>	IV	6.1	Barreras para la ampliación	40
<b>Lista de abreviaciones</b>	V	6.2	Estrategias de ampliación para la adopción de R290 en contenedores refrigerados	40
<b>Reconocimiento de apoyo, cooperación y comentarios</b>	VI	6.2.1	Apoyo regulatorio y normativo	41
<b>Prefacio</b>	VIII	6.2.2	Desarrollo de capacidades de las contrapartes cruciales	42
<b>Resumen Ejecutivo</b>	IX	6.2.3	Oportunidades de financiación y creación de asociaciones	43
<b>1</b>	<b>01</b>	<b>7</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>44</b>
<b>Introducción</b>			<b>Bibliografía</b>	<b>46</b>
<b>2</b>	<b>04</b>		<b>Publicaciones/Páginas relevantes</b>	<b>52</b>
<b>Antecedentes</b>			<b>Anexos</b>	<b>53</b>
<b>3</b>	<b>08</b>	<b>8</b>	<b>Escenario detallado de mitigación de emisiones</b>	<b>53</b>
<b>Contexto político actual para los contenedores refrigerados</b>		8.1	Exploración de escenarios	57
<b>4</b>	<b>12</b>	8.2	Escenarios de adopción de refrigerante R290	57
<b>Tecnologías y refrigerantes de contenedores refrigerados</b>		8.2.1	Ganancias en eficiencia energética	57
4.1 Refrigerantes en contenedores refrigerados	14	8.2.2	Programas de uso de refrigerante	58
4.2 Los desafíos de la inflamabilidad	21	8.2.3	Objetivos de reducción de la intensidad de las emisiones de la OMI	60
4.2.1 Normas de Seguridad para refrigerantes inflamables ISO 20854:2019	23	8.3	Resultados	62
4.3 Refrigerantes alternativos para contenedores refrigerados a futuro	26	8.3.1	Emisiones de gases de efecto invernadero	62
4.3.1 Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> /R744)	27	8.3.2	'Productos químicos eternos' y contenedores refrigerados	65
4.3.2 Propano (R290)	28	8.3.3	Análisis de sensibilidad	70
4.3.3 R1234yf	29			
<b>5</b>	<b>31</b>			
<b>Potencial de mitigación</b>				
5.1 Enfoque para el cálculo del potencial de mitigación	32			
5.2 'Productos químicos eternos' y contenedores refrigerados	36			
5.3 Resultados	39			

# Lista de figuras

Figura 1.	División modal de la carga refrigerada marítima	05	Figura 10.	Tasas futuras estimadas de deposición de TFA y de deposición de TFA para Europa debido a la degradación de HFO-1234yf exclusivamente	38
Figura 2.	Panorama regional del mercado global de contenedores refrigerados	06	Figura 11.	Ilustración de la exploración del escenario	61
Figura 3.	Calendario de reducción de la producción y el consumo permitidos, en porcentajes con respecto a las líneas de base definidas, de HFC controlados, expresados como CO <sub>2</sub> eq, en virtud de la Enmienda de Kigali	09	Figura 12.	Comportamiento de las emisiones directas e indirectas de los escenarios seleccionados, promedio de todos los años	63
Figura 4.	Esquema de un contenedor refrigerado parcialmente empacado.	12	Figura 13.	Emisiones anuales de escenarios promedios y su variabilidad	64
Figura 5.	Emisiones de HFC (superior) y su impacto en la temperatura media global de la superficie (inferior) según cuatro escenarios diferentes	15	Figura 14.	Emisiones máximas estimadas de TFA en toneladas/año para el grupo relevante de productos químicos	65
Figura 6.	Contribuciones históricas y proyectadas al cambio climático de las ODSs, los HFC de alto PCA, los HFO de bajo PCA y las alternativas no halogenadas, suponiendo el pleno cumplimiento de las disposiciones del Protocolo de Montreal, incluida la Enmienda de Kigali	16	Figura 15.	Tasas futuras estimadas de deposición de TFA y de deposición de TFA para Europa debido a la degradación de HFO-1234yf exclusivamente	66
Figura 7.	NaturaLINE® de Carrier, una unidad de refrigeración para contenedores refrigerados que opera con R744	27	Figura 16.	Ilustración de la exploración del escenario para la proyección de las emisiones de TFA	67
Figura 8.	Emisiones anuales de escenarios promedios y su variabilidad	36	Figura 17.	Ilustración de la exploración del escenario para la proyección de las emisiones de TFA	68
Figura 9.	Emisiones máximas estimadas de TFA en toneladas/año para el grupo relevante de productos químicos	37	Figura 18.	Proporción de refrigerante en las nuevas unidades y la correspondiente proyección de emisiones de TFA para el escenario 1 (gases fluorados de la UE / Sin adopción)	69

# Lista de tablas

<b>Tabla 1.</b>	Generalidades de refrigerantes utilizados en contenedores refrigerados	VIII	<b>Tabla 13.</b>	Proporción promedio de refrigerantes de nuevos contenedores refrigerados en los últimos cinco años (2019-2023) y su valor GWP100 años	58
<b>Tabla 2.</b>	Síntesis de los resultados del estudio IIR sobre pérdida alimentaria y cadena de frío	08	<b>Tabla 14.</b>	Programa inspirado en el Reglamento de gases fluorados de la UE, porcentaje de uso de refrigerante en nuevos contenedores refrigerados sin R290	59
<b>Tabla 3.</b>	Tasas de producción anual proyectada de TFA debido a la conversión atmosférica de R134a y R1234yf	17	<b>Tabla 15.</b>	Programa inspirado en la Enmienda de Kigali, proporción en el uso de refrigerantes en los nuevos contenedores refrigerados	59
<b>Tabla 4.</b>	Lista de valores de GWP, inflamabilidad y presencia de PFAS de refrigerantes y espumas seleccionados	20	<b>Tabla 16.</b>	Calendario de incumplimiento, proporción de uso de refrigerante en los nuevos contenedores refrigerados	60
<b>Tabla 5.</b>	Generalidades de refrigerantes utilizados en contenedores refrigerados	30	<b>Tabla 17.</b>	Programa inspirado en la Enmienda de Kigali, proporción en el uso de refrigerantes en los nuevos contenedores refrigerados, incluyendo la rápida adopción de R290	60
<b>Tabla 6.</b>	Emisiones de TFA calculadas para refrigerantes relevantes en contenedores refrigerados	33	<b>Tabla 18.</b>	Programa para la reducción de la intensidad de carbono de acuerdo con los objetivos de reducción de la OMI	60
<b>Tabla 7.</b>	Mezcla de combustibles utilizada para el escenario de mitigación basado en el Marco GLEC V3.1	34	<b>Tabla 19.</b>	Resumen de Escenarios	62
<b>Tabla 8.</b>	Designación de escenarios para la proyección de emisiones de TFA	39	<b>Tabla 20.</b>	Resumen de Emisiones	63
<b>Tabla 9.</b>	Emisiones de TFA calculadas para refrigerantes relevantes en contenedores refrigerados	54	<b>Tabla 21.</b>	Designación de escenarios para la proyección de emisiones de TFA	68
<b>Tabla 10.</b>	Descripción de los principales supuestos	56	<b>Tabla 22.</b>	Resumen de los cambios de entrada	70
<b>Tabla 11.</b>	Calendario de adopción de R290, en porcentaje de nuevas unidades	57			
<b>Tabla 12.</b>	Programa de ganancias de eficiencia energética, en porcentaje de disminución del consumo de energía	58			

# Lista de abreviaciones

ADI	Ingesta diaria aceptable	OMI	Organización Marítima Internacional
ANSI	Instituto Nacional Estadounidense de Normas	INTECO	Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica
API	Ingredientes farmacéuticos activos	ISO	Organización Internacional de Normalización
ASHRAE	Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado	KCC	Kuehne Climate Center
ATO	Certificación ATO de contenedores refrigerados, Universidad e Investigación de Wageningen	GNL	Gas natural licuado
BAU	“Business as usual”, escenario de negocio habitual o referencia	MAC	Aire acondicionado móvil
BMUV	Ministerio Federal de Medio Ambiente, Conservación de la Naturaleza y Seguridad Nuclear de Alemania (por sus siglas en alemán)	MARPOL	Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques de la Organización Marítima Internacional
BTU/h	Unidad térmica británica por hora, utilizada como alternativa a kW (1 kW = 3412.12 BTU/h)	MEPS	Normas mínimas de eficiencia energética
CFC	Clorofluorocarbonos	MINAE	Ministerio de Ambiente y Energía de la República de Costa Rica
COP	Coefficiente de rendimiento	MLF	Fondo Multilateral del Protocolo de Montreal
COP 28	Conferencia de las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático 28 en Dubái (Emiratos Árabes Unidos)	MOPT	Ministerio de Obras Públicas y Transporte de Costa Rica
ECHA	Agencia Europea de Sustancias y Mezclas Químicas	MUR	Unidades de refrigeración mecánicas
EE	Eficiencia energética	NDC	Contribuciones determinadas a nivel nacional
EER	Índice de Eficiencia energética	ODS	Sustancia que agota la capa de ozono
EU	Unión Europea	OMRA	Evaluación de riesgos del modo de funcionamiento
FMEA	Análisis de modos de falla y efectos	PFAS	Sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas
FTA	Análisis de árbol de fallas	PFBA	Ácido perfluorobutanoico
GCF	Fondo Verde para el Clima	PFPrA	Ácido perfluoropropanoico
GEI	Gases de efecto invernadero	PTI	Inspección previa al viaje
GIZ	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH	RAC	Refrigeración y Aire Acondicionado
GLEC	Consejo Global de Emisiones Logísticas	RACHP	Refrigeración, aire acondicionado y bomba de calor
GWP	Potencial de calentamiento global	REACH	Registro, evaluación, autorización y restricción de sustancias químicas
HAZOP	Análisis de peligros y operatividad	R & D	Investigación y desarrollo
HCFC	Hidroclorofluorocarbono	ODS	Objetivo de Desarrollo Sostenible
HFC	Hidrofluorocarbono	SEER	Índice de eficiencia energética estacional
HFO	Hidrofluoroolefina	SOLAS	Convenio Internacional para la Seguridad de la Vida Humana en el Mar
HPMP	Plan de gestión de la eliminación de HCFC	TEU	Unidades equivalentes a veinte pies
HVAC	Calefacción, ventilación y aire acondicionado	TEWI	Impacto total equivalente del calentamiento
IIR	Instituto Internacional de Refrigeración	TFA	Ácido trifluoroacético
IKI	Iniciativa Internacional sobre el Clima (de BMU)	PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
		CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
		WUR	Universidad e Investigación de Wageningen

# Reconocimiento de apoyo, cooperación y comentarios

Este documento se creó mediante un esfuerzo conjunto, con el objetivo de contribuir a crear conciencia sobre los contenedores de refrigeración marítima respetuosos con el clima y el ambiente en el escenario mundial.

El documento es una colaboración en el marco de la Alianza para la Transición de Contenedores Refrigerados Ecológicos, fundada por la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) y Kuehne Climate Center (KCC) en el marco del proyecto Greener Reefers de Proklima GIZ para el transporte marítimo. El proyecto está financiado por la Iniciativa Internacional del Clima en nombre del Ministerio Federal de Medio Ambiente, Conservación de la Naturaleza, Seguridad Nuclear y Protección del Consumidor de Alemania.

Nos gustaría expresar nuestro sincero agradecimiento a Manuel Salas Salazar por su invaluable apoyo para el análisis del potencial de mitigación de emisiones para contenedores amigables con el clima y el ambiente. Sus investigaciones y cálculos sientan las bases de este documento y establecen claramente las posibilidades y riesgos tecnológicos futuros para la industria naviera. Nuestro más profundo agradecimiento a Marius Bararu y Dan Timofte del Laboratorio Thermokrasia por sus valiosos comentarios y sugerencias, que mejoraron significativamente la calidad de este reporte.

Los autores agradecen las contribuciones del equipo de investigación de la Universidad Wageningen por su ayuda con los análisis del potencial de mitigación de emisiones. Agradecemos y apreciamos enormemente el apoyo a los datos suministrados por su base de datos de certificación de la ATO <sup>1</sup> y su apoyo y orientación en la elaboración de esta publicación. Esta colaboración mejoró decisivamente el análisis del potencial de mitigación y proporcionó el análisis de sensibilidad. Nos gustaría agradecer especialmente a Josianne Cloutier, Maxence Paillart y Leo Lukasse de la Universidad de Wageningen y al Equipo de Investigación por su gran contribución.

Estamos en deuda con Philipp Denzinger en GIZ por su motivación personal y paciencia durante todo el proceso y por ser un visionario para este proyecto.

También extendemos nuestra gratitud a Holger König, experto en sistemas de refrigeración, que en el pasado desarrolló un prototipo de un frigorífico que funciona con R290. Sus comentarios y sugerencias fueron muy beneficiosos.

Nos gustaría agradecer a nuestros colegas Lydia Ondraczek, Kirsten Orschulok y Adrian Fillmann del proyecto GIZ '(Contenedores Refrigerados Ecológicos o Greener Reefers)' por su colaboración y discusiones constructivas, así como a Mark Major del Kuehne Climate Center por su revisión exhaustiva y valiosos comentarios.

<sup>1</sup> Investigación de alimentos y base biológica de Wageningen, Certificación ATO de contenedores refrigerados, Universidad e Investigación de Wageningen, Consultado el 2 de mayo de 2024, de *Reefertransport - Inicio*



# Prefacio

La industria naviera mundial se encuentra en una coyuntura crucial. Como elemento vital del comercio internacional, se enfrenta a crecientes demandas de descarbonización manteniendo la integridad de las cadenas de suministro. Dentro de este panorama, los contenedores marítimos refrigerados, o reefers, juegan un papel fundamental. Estos contenedores son indispensables para el transporte de mercancías sensibles a la temperatura, pero su dependencia de refrigerantes de alto potencial de calentamiento global y operaciones intensivas en energía presenta un desafío significativo para nuestros objetivos climáticos colectivos.

Durante mi periodo como Jefe de Transporte Marítimo Global en Kühne + Nagel, tuve el privilegio de liderar iniciativas transformadoras que priorizaban la sostenibilidad en la logística marítima. Junto con nuestros socios, desarrollamos políticas climáticas pioneras destinadas a reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y avanzar en soluciones de transporte ecológicas. Estos esfuerzos no solo se alinearon con las regulaciones emergentes, sino que también anticiparon la demanda de opciones logísticas sostenibles de nuestros clientes.

En la COP28, junto con la GIZ, tuve el honor de presentar el proyecto que culminó con la presentación de esta publicación. Refleja una visión compartida para abordar los desafíos duales de la eficiencia operativa y la administración ambiental. Las ideas presentadas aquí, muestran el inmenso potencial de la transición a tecnologías refrigeradas respetuosas con el clima y el ambiente. Desde la adopción de refrigerantes naturales como el propano (R290) y el dióxido de carbono (R744) hasta la mejora de la eficiencia energética, estas innovaciones representan pasos tangibles hacia la descarbonización de las cadenas de frío marítimas.

Este documento es un testimonio del poder de la colaboración. Reúne investigación, experiencia de la industria y conocimientos de políticas para proporcionar una hoja de ruta integral para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector



de contenedores refrigerados. También destaca el papel fundamental de las asociaciones público-privadas, el desarrollo de capacidades y la alineación regulatoria para lograr un progreso significativo.

Como ex líder de la industria, reconozco los desafíos de impulsar el cambio dentro de un sector tan complejo y global como el transporte marítimo. Sin embargo, también sé que la acción audaz no solo es necesaria, sino que es posible. Este documento es tanto un llamado a la acción como una fuente de inspiración para las partes interesadas en todo el ecosistema marítimo.

Les insto a que se unan a nosotros para aprovechar las oportunidades aquí descritas. Juntos, podemos hacer que la industria de los contenedores refrigerados no solo sea una piedra angular del comercio mundial, sino también líder en la lucha contra el cambio climático.

Otto Schacht  
Asesor ante la Fundación Kühne /  
Ex Jefe de Transporte Marítimo Global, Kuehne+Nagel

# Resumen Ejecutivo

Este documento técnico ofrece un llamado urgente a la acción: la industria de contenedores refrigerados debe hacer la transición inmediata hacia tecnologías de refrigeración respetuosas con el clima. El impacto ambiental de los refrigerantes obsoletos es alarmante, con emisiones directas por fugas de refrigerante y emisiones indirectas por consumo de energía que llevan la huella de carbono del sector a niveles peligrosos. Sin una acción rápida y decisiva, la industria no cumplirá con los objetivos climáticos globales críticos, incluido el Acuerdo de París y la Estrategia 2023 de la Organización Marítima Internacional (OMI) para la reducción de GEI.

Los contenedores marítimos refrigerados, o reefers, son indispensables para el comercio mundial, ya que garantizan el transporte seguro de mercancías sensibles a la temperatura, como alimentos, productos farmacéuticos y productos electrónicos. Con el aumento de la demanda de contenedores refrigerados, que se prevé que crezca un 8% anual hasta 2030 <sup>2</sup>, la industria

se encuentra en un punto de inflexión. Sin embargo, la flota actual depende abrumadoramente de refrigerantes hidrofluorocarbonados (HFC) como el R134a y el R404A, que contienen sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas (PFAS), “sustancias químicas eternas”, y tienen potenciales de calentamiento global (GWP) muy elevados de 1.530 y 4.728, respectivamente. <sup>3</sup> Estas sustancias no solo permanecen en el ambiente; sino que también aceleran el cambio climático. Para agravar la crisis, los refrigerantes de contenedores refrigerados tienen fugas a tasas de hasta el 25%, liberando cantidades devastadoras de gases de efecto invernadero: 3,74 millones de toneladas de emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>eq) solo en 2018. <sup>4</sup>

## El momento de actuar es ahora

Nos estamos quedando sin tiempo para frenar estas emisiones. La transición a tecnologías de refrigeración sostenibles ya no es una opción, es una necesidad absoluta. Este documento explora soluciones viables que se alinean con los últimos marcos regulatorios,

Tabla 1. Resumen de refrigerantes utilizados en contenedores refrigerados

Refrigerante	Eficiencia energética y coeficiente de rendimiento. (COP <sup>5</sup> )	Potencial de calentamiento global (IPCC AR 6) <sup>6</sup>	Costos de refrigerantes <sup>7</sup>	Fin de la vida útil	Productos secundarios/PFAS <sup>8</sup>	Servicio y facilidad de servicio <sup>9</sup>	Conocimiento/Aplicación <sup>10</sup>	Inflamabilidad <sup>11</sup>	Toxicidad de los productos secundarios <sup>12</sup>	Resumen
R134a	✓	✗ 1530	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✗
R1234yf	✓	✓ 0.5	✗	✗	✗✗	✓	✓	✗	✗	✗✗
R290	✓✓	✓ 0.02	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓✓
R744 (CO <sub>2</sub> )	✓	✓ 1	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓

<sup>2</sup> *Perspectiva de la demanda del mercado de contenedores refrigerados, informe de 2024*

<sup>3</sup> Valores de GWP según el Sexto Informe de Evaluación (AR6) del IPCC

<sup>4</sup> E. Złoczowska, “EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LOS CONTENEDORES REFRIGERADOS,” *International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM*, Jun. 2018, doi: 10.5593/sgem2018/4.2/s19.043

<sup>5</sup> Futuras tecnologías de refrigeración con refrigerantes naturales. Comparación de eficiencia energética – Seguridad – Estándares y costes, 2013, *Intermodal Europe Hamburg Messe* por Holger König

<sup>6</sup> Informe de evaluación 6 de la IPCC *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*

<sup>7</sup> *Aumento significativo de los precios de los refrigerantes de mayor GWP - Cooling Post* Cooling Post 25.02.2025

<sup>8</sup> Comisión Europea 19.10.2023, Artículo de noticias de la Dirección General de Medio Ambiente *Health and environmental impacts prompt a call for strict ruling on ubiquitous 'forever chemicals'*

<sup>9</sup> Futuras tecnologías de refrigeración con refrigerantes naturales. Comparación de eficiencia energética – Seguridad – Estándares y costes, 2013, *Intermodal Europe Hamburg Messe* por Holger König

<sup>10</sup> *Ibd.*

<sup>11</sup> Hoja informativa 1 de ONU Medio Ambiente y ASHRAE: "Actualización sobre nuevas designaciones de refrigerantes y clasificaciones de seguridad", noviembre de 2022. *Hoja informativa #1 sobre refrigerantes del PNUMA/ASHRAE: Actualización sobre nuevas designaciones de refrigerantes y clasificaciones de seguridad*

<sup>12</sup> Michael Feller, Karin Lux, Christian Hohenstein, Andreas Kornath. Estructura y propiedades del 2,3,3,3-tetrafluoropropeno (HFO-1234yf). *Zeitschrift für Naturforschung B*, 2014; 69b: 379 DOI: 10.5560/ZNB.2014-4017

como el CO<sub>2</sub> (R744) y el propano (R290), que ofrecen un camino hacia un futuro más limpio y sostenible. También se compara con el R1234yf, que actualmente es favorecido por la industria debido a su aplicación en otros sistemas de aire acondicionado móviles.

### Desafíos clave y oportunidades urgentes

Pasar a refrigerantes naturales como CO<sub>2</sub> (R744) y propano (R290), ambos con un GWP de  $\leq 1$  y cero PFAS, representa un paso crucial. Sin embargo, a pesar de su promesa, las barreras técnicas, de seguridad y regulatorias continúan ralentizando la adopción. El sector marítimo debe superar estos obstáculos de inmediato. Normas como la ISO 20854:2019 para refrigerantes inflamables, incluidos el R290 y el R1234yf, deben adoptarse rápidamente para permitir su uso generalizado.

- 1. Cambio a refrigerantes naturales:** el uso de R290 y R744 puede reducir drásticamente las emisiones directas, y el R290 ofrece un mayor rendimiento comparado con los refrigerantes convencionales.
- 2. Revisión de la eficiencia energética:** las innovaciones en aislamientos, control de temperatura y logística podrían reducir las emisiones indirectas hasta en un 20%, especialmente cuando se combinan con refrigerantes naturales.

### La presión regulatoria está aumentando

La industria de los contenedores refrigerados se encuentra en una encrucijada regulatoria. Políticas internacionales como la Enmienda de Kigali al Protocolo de Montreal y el Reglamento sobre gases fluorados de la Unión Europea exigen la eliminación gradual de

los HFC. Mientras tanto, la creciente evidencia sobre la persistencia tóxica de PFAS, que se degrada en ácido trifluoroacético (TFA) peligroso, está agregando más urgencia. Las empresas que no hacen la transición corren el riesgo no solo de sanciones regulatorias, sino también de consecuencias financieras y reputacionales.

### ¿Qué está en juego?

Utilizando modelos detallados de emisiones, este documento presenta proyecciones contrastantes. Los análisis tienen en cuenta el cumplimiento y el incumplimiento de las políticas existentes, así como la composición actual y futura de la flota de contenedores refrigerados:

- La diferencia entre la acción decisiva y la inacción es asombrosa: 171,8 Mt CO<sub>2</sub>eq, equivalente a las emisiones anuales de 40 centrales eléctricas de carbón.
- La transición inmediata a contenedores refrigerados basados en R290 podría reducir drásticamente las emisiones y la contaminación por PFAS.
- Los objetivos de reducción de gases de efecto invernadero (GEI) de la OMI para 2050 no pueden cumplirse sin la adopción generalizada de tecnologías ecológicas y una prevención rigurosa de fugas de refrigerante.

El estudio proyecta reducciones sustanciales en las emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> en diferentes escenarios, así como en PFAS, lo que enfatiza la necesidad de hacer la transición a refrigerantes naturales. Por ejemplo, para 2050, la adopción de R290 en solo el 50% de los nuevos contenedores refrigerados podría lograr ahorros significativos de GEI.

### El camino a seguir: ampliar la adopción del R290

La adopción del propano (R290) en los contenedores refrigerados es una oportunidad revolucionaria para descarbonizar el sector. Sin embargo, su adopción se ve obstaculizada por una compleja interacción entre desafíos técnicos, regulatorios y de mercado, incluidos problemas de seguridad, compatibilidad de infraestructura e incentivos financieros limitados. Para abordar estas barreras, se requiere un enfoque multi-dimensional, que integre los avances tecnológicos, marcos normativos internacionales y nacionales sólidos, programas de creación de capacidades y mecanismos de financiación innovadores. El sector debe actuar con decisión y a escala.

Una transición exitosa requiere:

- **Desarrollo e implementación de tecnología:** aceleración de las pruebas de prototipos y la integración de diseños energéticamente eficientes.
- **Regulaciones y apoyo político más estrictos:** los marcos regulatorios globales y nacionales deben incentivar el cambio a refrigerantes sostenibles.
- **Desarrollo de capacidades:** capacitar a las personas técnicas y sensibilizar a los principales actores de la industria, incluidas las compañías navieras y los organismos reguladores.
- **Movilización financiera y asociaciones:** aprovechar mercados de carbono, incentivos gubernamentales y las asociaciones público-privadas para reducir la carga financiera y fomentar la colaboración entre sectores.

### Un momento decisivo para la industria de contenedores refrigerados

Alcanzar el objetivo de 1,5 °C establecido por el Acuerdo de París es cada vez más improbable, ya que los esfuerzos actuales siguen siendo insuficientes para frenar el calentamiento global. Para cerrar esta brecha, la industria de los contenedores refrigerados debe tomar medidas inmediatas y audaces para acelerar la reducción de emisiones. Al mismo tiempo, la competencia tecnológica se está intensificando, con actores emergentes que desarrollan e implementan rápidamente soluciones de refrigeración innovadoras.

Al fomentar la colaboración entre fabricantes, empresas de logística y reguladores, la industria de los contenedores refrigerados puede desbloquear importantes beneficios climáticos, al tiempo que impulsa soluciones rentables. Los hallazgos son claros: para los propietarios de contenedores, la inacción no es una opción: la inversión en tecnologías de próxima generación y respetuosas con el clima es esencial para seguir siendo competitivos en un mercado que está cambiando hacia la sostenibilidad. La transición a contenedores refrigerados ecológicos no solo es factible, sino que es imperativa. Las empresas que adopten refrigerantes naturales y tecnologías de eficiencia energética liderarán la carga hacia una industria más limpia y competitiva. Aquellos que dudan, corren el riesgo de quedarse atrás en un panorama regulatorio y de mercado en rápida evolución.

# 1 Introducción

Los contenedores marítimos refrigerados, o reefers, son un componente vital del comercio mundial, ya que permiten el transporte seguro de mercancías sensibles a la temperatura, como alimentos, productos farmacéuticos y productos electrónicos. Estos contenedores son indispensables para mantener la integridad de la cadena de frío, asegurando que los productos perecederos lleguen a su destino en óptimas condiciones. A medida que el comercio internacional continúa creciendo, la demanda de contenedores refrigerados ha aumentado significativamente, superando el crecimiento general del comercio debido a factores económicos, técnicos y de ubicación.<sup>13</sup> Hoy en día, la industria naviera mundial se encuentra en una coyuntura crucial, ya que debe satisfacer las crecientes demandas de descarbonización mientras mantiene la integridad de las cadenas de suministro en un mercado en crecimiento.

En 2018, la Organización Marítima Internacional (OMI) estimó que aproximadamente 2,49 millones de contenedores refrigerados (reefers) se utilizaron activamente en el transporte marítimo internacional. Esta cifra representa los contenedores refrigerados empleados específicamente en el comercio internacional en lugar de la flota mundial total, que también incluye unidades utilizadas en logística nacional o no marítima. Se espera que el número de contenedores refrigerados en el transporte marítimo internacional crezca significativamente debido a la creciente demanda de logística que requiere de temperatura controlada.<sup>14</sup>

Sin embargo, el uso generalizado de contenedores refrigerados plantea importantes desafíos ambientales, particularmente en términos de consumo de energía y emisiones. Por ejemplo, se estima que la refrigeración

en este tipo de contenedores representa entre el 30% y el 40% del consumo de energía en las terminales de contenedores de todo el mundo. Este crecimiento subraya la necesidad urgente de abordar su impacto ambiental. La tecnología actual de contenedores refrigerados se basa predominantemente en refrigerantes de hidrofluorocarbono (HFC). De estos, el R134a es el más utilizado, representando el gas refrigerante presente en más del 95% de la flota mundial. Con un potencial de calentamiento global (GWP) de 1.530, el R134a contribuye significativamente a las emisiones de gases de efecto invernadero. El segundo refrigerante más común, el R404A, tiene un GWP aún mayor de 4.728.<sup>15, 16, 17, 18, 19</sup>

Investigaciones académicas estiman que las tasas de fuga en los aparatos de refrigeración oscilan entre el 15% y el 25%<sup>20</sup>, lo que aumenta su impacto ambiental. Según el Marco del Consejo Global de Emisiones Logísticas (GLEC)<sup>21</sup>, que cubre los cálculos de emisiones para el transporte de mercancías por carretera y marítimo, esta tasa de fuga puede ser tan alta como un 32,5% para las unidades móviles de carga con temperatura controlada.<sup>22</sup> Solo en 2018, se estima que se emitieron 3,74 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>eq por fugas de refrigerantes. Pero las emisiones no se limitan a las liberaciones directas, ya que las ineficiencias causadas por la pérdida de refrigerante provocan un mayor consumo de energía, y exacerbaban aún más las emisiones indirectas. Estos factores ponen en relieve la urgente necesidad de alternativas sostenibles. La transición a tecnologías de refrigeración más sostenibles debe superar varios desafíos, incluida la mayor inflamabilidad de algunos refrigerantes naturales en comparación con los refrigerantes sintéticos, la toxicidad del amoníaco, el riesgo de asfixia del CO<sub>2</sub> y la necesidad de mejorar las normas

13 El transporte marítimo refrigerado supera el crecimiento de la carga seca debido a la demanda de productos perecederos y farmacéuticos. Consultado el 12 de diciembre de 2024 de *Solicitar PDF de muestra - Tamaño del mercado de contenedores refrigerados, participación en la industria | Pronóstico, 2032*

14 OMI. (2020). Cuarto estudio GEI de la OMI 2020.

15 Van Duin, R., et al. (2018). Enfriamiento: Un enfoque de simulación para reducir los picos de energía de los contenedores refrigerados en las terminales.

16 Van Duin, R., et al. (2019). Factores que causan el consumo máximo de energía de los contenedores refrigerados en las terminales de contenedores.

17 Investigación de alimentos y base biológica de Wageningen, Certificación ATO de contenedores refrigerados, Universidad e Investigación de Wageningen, Consultado el 2 de mayo, 2024, de *Reefertransport - Home*

18 Foster, P. et al. (2021). El presupuesto energético de la Tierra, las retroalimentaciones climáticas y la sensibilidad climática

19 Protocolo de Gases de Efecto Invernadero(2024), 2024 IPCC Global Warming Potential Values. Consultado el Septiembre 24, 2024, de *Microsoft Word - Global-Warming-Potential-Values.docx (ghgprotocol.org)*

20 E. Złoczowska, "EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LOS CONTENEDORES REFRIGERADOS TRANSPORTADOS POR MAR", International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM ..., Jun. 2018, doi: 10.5593/sgem2018/4.2/s19.043

21 La tasa de fuga considerada en esta publicación se basa en la literatura pública disponible y, debido a la falta de datos directos, contrastados y fiables relacionados a la pérdida de refrigerante en sistemas, se asume como valor conservador y así mismo típico para otras aplicaciones de la refrigeración del transporte.

22 Marco del Consejo Mundial de Emisiones Logísticas para la contabilidad y presentación de informes de emisiones logísticas V3.1 (2024) *GLEC\_FRAMEWORK\_v3\_UPDATED\_04\_12\_24.pdf*

## 1 Introducción



Una vista de un puerto en Marruecos. © GIZ / Mohammed Bakir

de seguridad. Las normas actuales, como la ISO 20854, proporcionan un marco práctico para el uso de refrigerantes inflamables como el R290 en el transporte marítimo, pero una adopción más amplia requiere superar las barreras de seguridad tanto técnicas como percibidas.

El R290 está emergiendo como un refrigerante sostenible en aplicaciones móviles en varios sectores del transporte. En la industria automotriz, iniciativas como el Programa de Demostración de Tecnología de Aire Acondicionado para Automóviles Ecológicos han desarrollado con éxito sistemas de aire acondicionado móviles utilizando R290, que ofrecen un bajo GWP y una mayor eficiencia energética.<sup>23</sup> Del mismo modo,

en el sector ferroviario, empresas como Sistemas de Transporte Liebherr han comenzado a suministrar sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) producidos en serie, que utilizan R290 como refrigerante natural. Por ejemplo, Liebherr ha recibido el encargo de entregar 80 unidades HVAC de salón, 80 unidades de recuperación de calor y 40 unidades de cabina para las unidades múltiples eléctricas FLIRT de Stadler operadas en Finlandia, lo que marca un paso significativo hacia la movilidad sostenible en las operaciones ferroviarias.<sup>24</sup> Estos desarrollos subrayan el potencial del R290 para reducir el impacto ambiental mientras se mantiene la eficiencia en varios modos de transporte.

<sup>23</sup> Instituto para la Gobernanza y el Desarrollo Sostenible (IGSD), Noticias 10.02.2025 *Cómo el enfriamiento del R-290 está transformando el sector automotriz y luchando contra los supercontaminantes - Instituto para la Gobernanza y el Desarrollo Sostenible*

<sup>24</sup> Noticias de Liebherr 11.06.2024, Liebherr suministra por primera vez sistemas HVAC basados en propano producidos en serie, *Liebherr suministra por primera vez sistemas HVAC basados en propano producidos en serie - Liebherr*

## 1 Introducción

La perspectiva a largo plazo, teniendo en cuenta las regulaciones emergentes como REACH (Registro, Evaluación, Autorización y Restricción de Productos Químicos) de la UE y una creciente demanda de opciones logísticas sostenibles, enfatiza que la industria naviera mundial debe superar esas barreras y hacer la transición a contenedores refrigerados con refrigerantes naturales para evitar malas inversiones. Muchos HFC como el R1234yf y sus mezclas se descomponen en sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas (PFAS), también conocidas como “sustancias químicas eternas”, que persisten en el ambiente y pueden ser tóxicas para humanos y animales. Como resultado, el sector está bajo una presión cada vez mayor para cambiar a refrigerantes naturales como el propano (R290) y el dióxido de carbono (R744), que tienen un bajo GWP de  $\leq 1$  y un impacto ambiental mínimo.<sup>25</sup>

Este documento examina el potencial de los refrigerantes naturales como el propano (R290) y el dióxido de carbono (R744) como alternativas de bajo GWP, así como el papel de las mejoras en la eficiencia energética para reducir las emisiones indirectas. En el contexto político más amplio, las regulaciones internacionales están impulsando el cambio. Acuerdos como la Enmienda de Kigali al Protocolo de Montreal y el Reglamento de gases fluorados de la Unión Europea exigen una eliminación gradual de los HFC. Estas políticas no solo establecen objetivos ambiciosos, sino que también crean oportunidades para la innovación en el sector de la refrigeración marítima.

Después de proporcionar una visión general de los principales marcos de políticas (Capítulo 3) y del sector de la refrigeración, incluida la tecnología (Capítulo 4), este documento explora diferentes escenarios de mitigación y analiza la reducción potencial de las emisiones

de gases de efecto invernadero y la huella ambiental que puede lograrse mediante la adopción de tecnologías más ecológicas (Capítulo 5). Al presentar modelos y proyecciones detallados, demuestra los beneficios tangibles de cambiar a refrigerantes naturales.

El examen detallado de los contenedores refrigerados respetuosos con el clima y el ambiente, incluida la atención a la escasez de técnicos calificados, las oportunidades de mercado y la ampliación de esta tecnología, proporciona información valiosa (Capítulo 6). Al ofrecer un análisis exhaustivo de las tecnologías actuales, los marcos regulatorios y los escenarios futuros, este informe tiene como objetivo guiar a las partes interesadas en la adopción de prácticas sostenibles. La transición a contenedores refrigerados más ecológicos no solo respalda los objetivos climáticos globales, sino que también garantiza la viabilidad a largo plazo del sector logístico de la cadena de frío.

Este documento, desarrollado por la Alianza de Transición hacia Contenedores Refrigerados Ecológicos, una iniciativa de GIZ y Kuehne Climate Center, tiene como objetivo cerrar esta brecha, abordando la falta de hojas de ruta claras y estrategias prácticas específicas para la transición del sector refrigerado hacia soluciones sostenibles y respetuosas con el clima. Proporciona una visión general completa de las tecnologías actuales de contenedores refrigerados, evalúa posibles alternativas respetuosas con el clima y presenta escenarios de mitigación basados en la adopción de refrigerantes naturales y soluciones energéticamente eficientes. Al fomentar la colaboración entre las partes interesadas, el proyecto de Contenedores Refrigerados Ecológicos tiene como objetivo demostrar la viabilidad de tecnologías de refrigeración más ecológicas y acelerar la transición de la industria hacia un futuro sostenible.

<sup>25</sup> Organización Marítima Internacional (2023). Estrategia de la OMI para 2023 sobre la reducción de las emisiones de GEI de los buques. Consultado el 3 de Mayo, 2024, de 2023 Estrategia de la OMI sobre la reducción de las emisiones de GEI de los buques

## 2 Antecedentes

Desde finales de la década de 1950, los contenedores refrigerados han existido como contenedores intermodales refrigerados y aislados con unidades de refrigeración incorporadas que pueden controlar la temperatura y la humedad. Se utilizan para transportar productos sensibles a estos factores, como alimentos, flores, productos farmacéuticos y productos químicos. Muchos de estos productos son esenciales para la vida diaria. Con el declive de los buques refrigerados dedicados, los contenedores refrigerados se han convertido en la solución estándar para el transporte de productos perecederos.

Los contenedores refrigerados son duraderos y altamente funcionales, capaces de controlar la temperatura del compartimiento de carga dentro de un rango de  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , así como regular los niveles de humedad. Algunos modelos incluso regulan los niveles atmosféricos de dióxido de carbono y oxígeno. Actualmente, la mayoría de los contenedores refrigerados de la flota utilizan R134a como refrigerante, con una participación de mercado del 96%, y participaciones más pequeñas para R404A, R452A, R513A y R744 ( $\text{CO}_2$ ). Sin embargo, debido a las políticas ambientales y climáticas, existe una creciente necesidad de eliminar gradualmente el R134a, que tiene un potencial de calentamiento global de 1.530.

Un contenedor refrigerado se puede utilizar como contenedor estacionario, en cuyo caso puede almacenar una variedad de productos, incluidos productos farmacéuticos o alimentos y bebidas. Los posibles clientes/usuarios/ubicaciones son hospitales, laboratorios, tiendas de comestibles, almacenes, panaderías, grandes eventos deportivos o festivales de música.

Un contenedor refrigerado tiene dos componentes principales: 1) la unidad de enfriamiento y 2) la caja aislada. La unidad de refrigeración de un contenedor refrigerado reduce la temperatura del aire circulado por los ventiladores. El aire a baja temperatura se suministra a la bodega en la parte inferior del contenedor

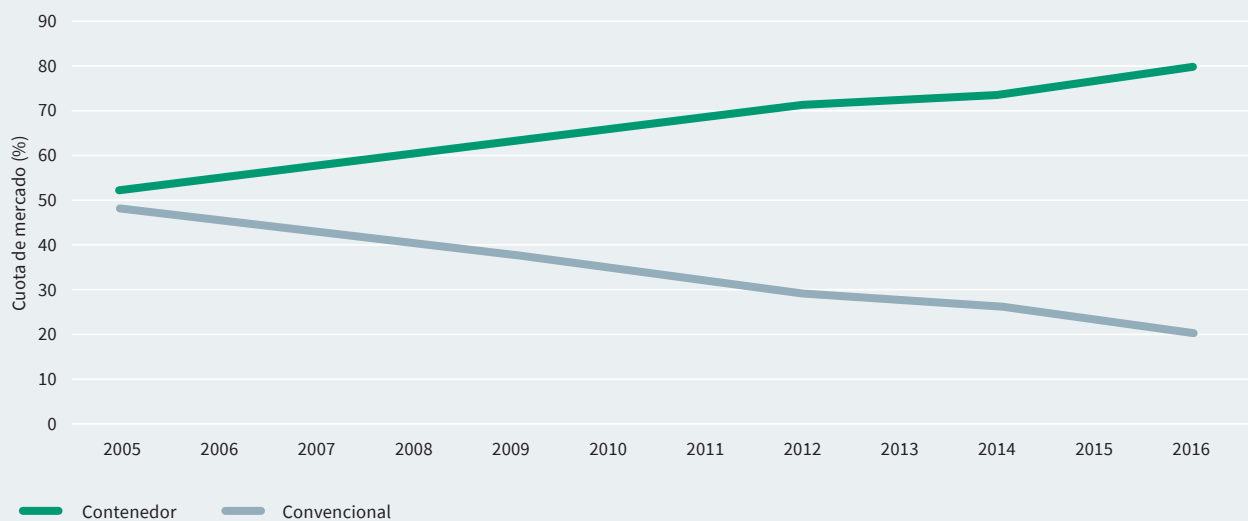
refrigerado a través de la llamada barra en T del piso del frigorífico, y el aire a temperatura más alta se devuelve a la unidad de refrigeración en la parte superior. La temperatura del aire de suministro y retorno se monitorea constantemente, lo que permite que el sistema de refrigeración mantenga la temperatura deseada de la carga, la humedad relativa (HR), los puntos de ajuste de  $\text{O}_2$  y/o  $\text{CO}_2$ .

Los contenedores refrigerados están aislados para evitar que la temperatura ambiental afecte la carga y están pintados de blanco para limitar el impacto de la radiación solar. Aunque el contenedor refrigerado está diseñado para mantener una temperatura constante en el punto de ajuste requerido, esto depende del algoritmo de control del sistema de refrigeración, las condiciones de embalaje, un suministro de energía eléctrica seguro y el manejo adecuado del contenedor refrigerado en varios puntos de transferencia. La temperatura dentro del contenedor refrigerado depende de la naturaleza de la carga, ya sea congelada, inerte o viva, así como de la temperatura externa y la radiación solar. Los contenedores refrigerados están diseñados para mantener una temperatura constante dentro del contenedor de aproximadamente  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$  con temperaturas externas entre  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Durante el transporte, los contenedores refrigerados suelen estar conectados al suministro eléctrico del barco. Se requieren grandes bancos de ventiladores para disipar el exceso de calor generado por los contenedores, lo que aumenta aún más la demanda indirecta de energía. Los generadores diésel, y últimamente también los bancos de baterías, generalmente instalados en el remolque refrigerado o en el remolque del camión, alimentan las unidades refrigeradas para el transporte terrestre en el chasis del remolque o en el ferrocarril en el material rodante. La potencia requerida según ISO 1496-2 es de 360-500 V y 50-60 Hz. Durante las operaciones portuarias, generalmente se conectan a un generador diésel o a la red eléctrica.

## 2 Antecedentes

Figura 1. División modal de la carga refrigerada marítima<sup>26</sup>



En cada etapa, los contenedores refrigerados son un importante contribuyente al consumo de energía. El tamaño de una unidad refrigerada está estrictamente regulado por varias normas para garantizar la compatibilidad entre el transporte marítimo, por carretera y ferroviario. Tanto la unidad refrigerada como el contenedor deben cumplir con las normas específicas de la Organización Internacional de Normalización (ISO), como la ISO 1496-2:2018 para contenedores térmicos. Además, la norma ISO 20854:2019 describe los requisitos operativos y de diseño necesarios para explorar refrigerantes alternativos como el R290 (propano) y el

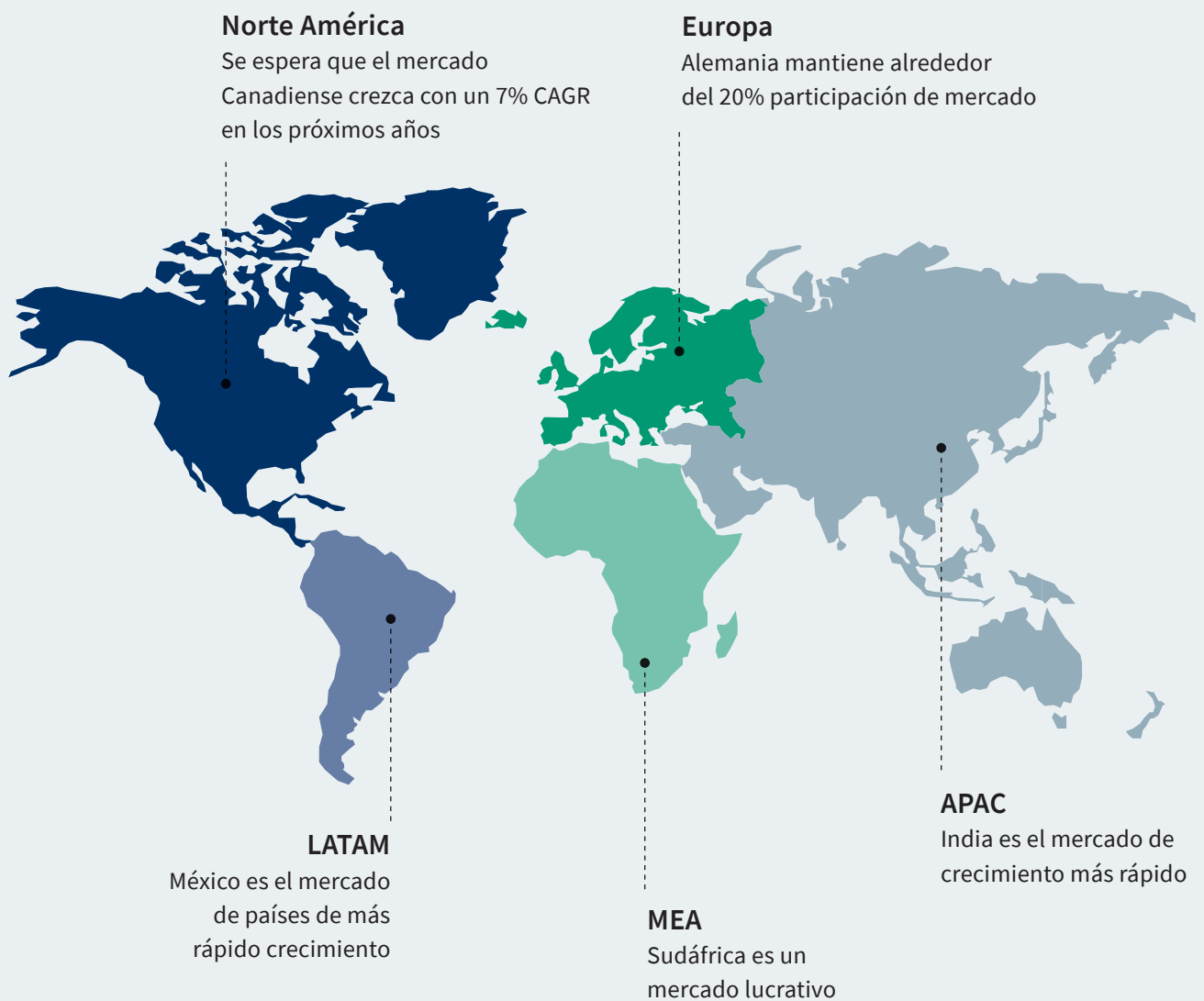
R1234yf, que son inflamables. Estas regulaciones están dando forma al mercado de contenedores refrigerados y su crecimiento.

Los contenedores refrigerados son el modo de transporte preferido porque pueden manejar envíos más pequeños, ofrecen un control de temperatura más preciso y garantizan una mejor compatibilidad con el transporte terrestre. La Figura 1 ilustra la gran demanda de contenedores refrigerados, que han aumentado significativamente su participación de mercado en comparación con los contenedores secos.

<sup>26</sup> Castelein, B., et al. (2020). El mercado de contenedores refrigerados y la investigación académica: un estudio de revisión

## 2 Antecedentes

Figura 2. Panorama regional del mercado global de contenedores refrigerados <sup>29</sup>



Fuente: [www.psmarketresearch.com](http://www.psmarketresearch.com)

## 2 Antecedentes

Se transportan más productos perecederos por mar que por aire debido a una menor huella de carbono. El desarrollo de nuevos nichos, como el transporte de baterías y productos farmacéuticos, son nuevas oportunidades para el uso de los contenedores refrigerados<sup>27, 28</sup> al igual que las demandas ambientales de los minoristas, que han aumentado, por ejemplo, el transporte marítimo de flores cortadas.

Impulsado por la demanda mundial, el mercado de contenedores refrigerados se está expandiendo a una tasa de crecimiento anual de hasta el 8%, siendo América Latina la región de más rápido crecimiento entre 2017 a 2030 y China clasificándose como el mercado más grande por país en 2019 (ver Figura 2). Además, el uso de buques frigoríficos dedicados, tiende a disminuir a medida que los buques de contenedores refrigerados continúan dominando el mercado, ofreciendo una mayor flexibilidad e integración en las cadenas logísticas existentes.<sup>30</sup>

Las prácticas operativas y la calidad del servicio y el mantenimiento tienen un impacto significativo en la vida útil de un contenedor refrigerado, que varios informes estiman entre 12 y 18 años. Sin embargo, actualmente faltan datos sobre la “segunda vida” de

los contenedores refrigerados, en lo que respecta a su reutilización para usos como el almacenamiento en frío estacionario o las estructuras modulares, y las soluciones al final de la vida útil de los refrigerantes utilizados son en gran medida inexistentes. Mientras tanto, los principales fabricantes de contenedores refrigerados han producido constantemente más de 100.000 unidades nuevas por año durante los últimos cinco años.<sup>31, 32, 33</sup>

Las principales líneas y operadores navieros, como Maersk Line (Dinamarca), MSC (Suiza), Hapag-Lloyd (Alemania) y CMA CGM (Francia) siguen teniendo su sede principalmente en Europa.

Los cinco principales proveedores mundiales de unidades de refrigeración son Carrier Transcold (EE. UU.), Daikin (Japón), MCI (Dinamarca) y Trane Technologies/Thermo King (Irlanda), seguidos de Klinge (EE. UU.). Estos proveedores tienen una amplia gama de productos e instalaciones de producción en todo el mundo. Las unidades de refrigeración para contenedores refrigerados se producen principalmente en Singapur y China, que están cerca de las plantas de ensamblaje de los contenedores refrigerados.<sup>34</sup>

27 Ibid.

28 Lukasse, L., et al. (2023). Perspectivas sobre la evolución de los contenedores refrigerados para el transporte de productos frescos.

29 P&S Intelligence (2024). Informe de mercado de contenedores refrigerados (2024 - 2030)

30 Dynamar. (2020). Análisis de Contenedores Refrigerados 2020: Generalidades de Contenido e introducción.

31 Ibid.

32 Investigación de alimentos y base biológica de Wageningen, ATO Certificación ATO de Contenedores Refrigerados, Universidad Wageningen e Investigación, Consultados el 2 Mayo, 2024, de <https://www.reefertransport.nl/Reefertransport-Home>

33 El informe Drewry estima entre 115,000 y 190,000 unidades nuevas desde el año 2020.

34 Lundsgaard, C. A., et al. (2020). Estudio preparatorio sobre Contenedores Refrigerados: Informe sobre Trabajos 1 y 2. Estudio preparatorio sobre Contenedores Refrigerados: Informe sobre Trabajos 1 y 2.

# 3 Contexto político actual para los contenedores refrigerados

El Acuerdo de París de 2015, en el marco de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), representa un compromiso histórico de los países y, de forma voluntaria, de las empresas para combatir el cambio climático, limitar el calentamiento global a 1,5 °C y fomentar medidas e inversiones destinadas a lograr un futuro bajo en carbono, resiliente al clima y sostenible.

Los esfuerzos del Acuerdo de París se reflejan en las contribuciones determinadas a nivel nacional (NDC) de los países, que describen los objetivos y estrategias individuales de cada país para mitigar las emisiones y adaptarse al cambio climático. Las políticas nacionales para su industria, y también las propias estrategias de las empresas, se comprometen con los objetivos del Acuerdo de París, como los propietarios y operadores de carga marítima. Al explorar e implementar soluciones y tecnologías de enfriamiento ecológico, respetuosas con el clima y energéticamente eficientes, los países y las empresas pueden reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero y contribuir a los esfuerzos globales para la transición hacia una industria de enfriamiento sostenible. Las NDC de los países tienen el potencial de desempeñar un papel fundamental en la aceleración de la adopción de tecnologías y prácticas de enfriamiento ecológico, reduciendo así el impacto ambiental del sector de enfriamiento.

Si bien la adopción de tecnologías de enfriamiento verde tiene como objetivo principal reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mejorar la eficiencia energética, su impacto se extiende más allá de los beneficios ambientales. Estas innovaciones son cada vez más relevantes en varios sectores, particularmente para aquellos que dependen en gran medida de sistemas de temperatura controlada. Por ejemplo, en industrias como la logística alimentaria y farmacéutica, el papel de las tecnologías de refrigeración no solo tiene que ver con la sostenibilidad, sino también con garantizar la

calidad del producto y minimizar las pérdidas durante el transporte.

El papel de la tecnología moderna, en particular los contenedores refrigerados (reefers), es crucial para mantener una cadena de frío eficiente. Al garantizar un control adecuado de la temperatura durante el transporte, los contenedores refrigerados pueden ayudar a reducir las pérdidas mundiales de alimentos. Aunque la mayoría de las pérdidas de alimentos se producen en el punto de producción, venta al por menor y consumo, garantizar el funcionamiento de la cadena de frío y la estabilidad de la temperatura durante el transporte de consumibles en contenedores desempeña un papel esencial para minimizar las pérdidas mundiales de alimentos. Un estudio reciente publicado por IIR<sup>35</sup> estimó que, en 2017, el 12% de los alimentos producidos a nivel mundial se perdió debido a una cadena de frío inadecuada, esto representa el equivalente a 526 millones de toneladas (Mt).

Tabla 2. Síntesis de los resultados del estudio IIR sobre pérdida alimentaria y cadena de frío<sup>36</sup>

Designación	Valor (cadena de frío actual)	Valor (cadena de frío mejorada)	Unidad
Pérdidas de alimentos por falta de refrigeración	526	236	Mt
Emisiones de CO <sub>2</sub> por pérdidas de alimentos	1004	76	Mt CO <sub>2</sub> eq
Emisiones de CO <sub>2</sub> de los equipos	261	589	Mt CO <sub>2</sub> eq
CO <sub>2</sub> total debido a la cadena de frío	1265	665	Mt CO <sub>2</sub> eq

<sup>35</sup> Sarr, J., et al. (2021). La huella de carbono de la cadena de frío, 7ª nota informativa sobre refrigeración y alimentación.

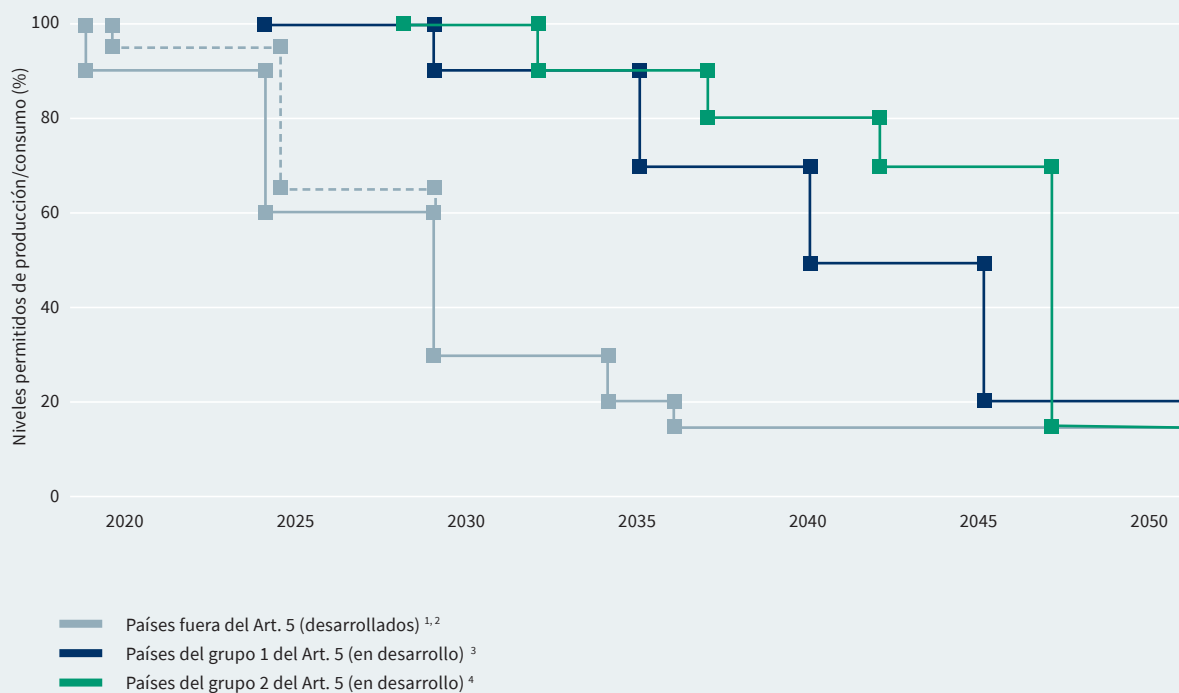
<sup>36</sup> Ibid.

### 3 Contexto político actual para los contenedores refrigerados

Aumentar la cobertura de refrigeración al nivel de los países desarrollados, aumentando el número de unidades de refrigeración per cápita en todos los países, podría reducir las emisiones derivadas de las pérdidas de alimentos en un 47%, o alrededor de 600 Mt CO<sub>2</sub>eq.

Ampliar la cobertura mundial de refrigeración a los niveles observados en los países desarrollados tiene el potencial de reducir sustancialmente las emisiones asociadas con la pérdida de alimentos. Cuando se combina con iniciativas internacionales como la Enmienda de Kigali, esta estrategia ofrece una oportunidad significativa para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y promover tecnologías de enfriamiento respetuosas con el clima.

Figura 3. Calendario de reducción de la producción y el consumo permitidos, en porcentajes con respecto a las líneas de base definidas, de HFC controlados, expresados como CO<sub>2</sub>eq, en virtud de la Enmienda de Kigali<sup>37</sup>



<sup>37</sup> Organización Meteorológica Mundial (OMM). Evaluación científica del agotamiento de la capa de ozono: 2022.

### 3 Contexto político actual para los contenedores refrigerados

La Enmienda de Kigali al Protocolo de Montreal es un acuerdo internacional que tiene como objetivo reducir gradualmente la producción y el consumo de hidrofluorocarbonos (HFC), que son potentes gases de efecto invernadero comúnmente utilizados en los sistemas de refrigeración y aire acondicionado (Figura 3). La enmienda fue adoptada en 2016 y ha sido ratificada por más de 100 países. Se espera que la Enmienda de Kigali evite hasta 0,4 °C de calentamiento global para finales de siglo y se considera un paso significativo hacia el logro de los objetivos del Acuerdo de París. La enmienda también brinda la oportunidad de promover el uso de tecnologías de refrigeración energéticamente eficientes y respetuosas con el clima, como los refrigerantes naturales, que pueden ayudar a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mejorar la eficiencia energética.

Las emisiones del transporte marítimo generalmente se dividen en dos categorías: nacionales e internacionales. Las emisiones nacionales son el resultado de las actividades de transporte marítimo que tienen lugar dentro de las aguas territoriales y los puertos de un país, que generalmente apoyan el comercio y el transporte nacionales. Por el contrario, las emisiones internacionales son generadas por las embarcaciones que viajan entre diferentes países. Esta distinción es importante porque las metodologías para contabilizar y gestionar estas emisiones son muy diferentes.

La Organización Marítima Internacional (OMI) es responsable de regular las emisiones marítimas internacionales y no supervisa directamente las emisiones nacionales. Sin embargo, las regulaciones de la OMI, incluido el desarrollo de estándares de combustible, medidas de eficiencia y estrategias de descarbonización, a menudo se extienden al transporte marítimo nacional, influyendo en las políticas y prácticas operativas nacionales.

La Estrategia de la OMI para 2023 **sobre la reducción de las emisiones de GEI de los buques**<sup>38</sup> establece un marco propicio para la propuesta y el desarrollo de proyectos e iniciativas que promuevan la descarbonización del sector. La estrategia fomenta la innovación tecnológica para sistemas de propulsión avanzados y combustibles alternativos, con un enfoque en la eficiencia del combustible. También proporciona financiación para proyectos de investigación y desarrollo, facilitando asociaciones y colaboraciones con otras organizaciones internacionales, partes interesadas de la industria y gobiernos en busca de nuevas formas de reducir las emisiones. Además, la OMI está sentando las bases para el establecimiento de un instrumento económico, como un régimen de comercio de derechos de emisión, en el que los buques puedan comprar y vender créditos de carbono. Los ingresos generados por dichos esquemas se pueden utilizar para acelerar los avances tecnológicos dentro del sector. La OMI también está aplicando el Protocolo de Montreal sobre sustancias que agotan la capa de ozono (SAO) – Reglamento 12, cuyo objetivo es eliminar gradualmente los HFC y los clorofluorocarbonos (CFC) utilizados habitualmente en los sistemas de refrigeración, incluidos los de los contenedores refrigerados (unidades refrigeradas). Se espera que este desarrollo tenga un impacto sustancial en la tecnología refrigerada, ya que fomentará la adopción de refrigerantes alternativos que tengan un menor impacto ambiental. Ejemplos de tales refrigerantes incluyen R290 y R1234yf.<sup>39</sup>

Además, el Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques (MARPOL 2020)<sup>40</sup> y el Convenio Internacional para la Seguridad de la Vida Humana en el Mar (SOLAS)<sup>41</sup> son de vital importancia. MARPOL 2020 establece directrices para controlar las emisiones de óxido de azufre, reduciendo así la contaminación causada por los buques. Por el contrario,

38 Organización Marítima Internacional (2023) Estrategia de la OMI sobre la reducción de las emisiones de GEI de los buques en 2023. Consultado el 3 de mayo de 2024 de *2023 Estrategia de la OMI sobre la reducción de las emisiones de GEI de los buques de 2023*

39 *Sustancias agotadoras de la capa de ozono (ODS) - Regulación 12 (imo.org)*

40 Organización Marítima Internacional (s.f.). OMI 2020 – reducción de las emisiones de óxido de azufre. Consultado el 3 de mayo de 2024 de *OMI 2020 – reducción de las emisiones de óxido de azufre*

41 Organización Marítima Internacional (1974). Convenio Internacional para la Seguridad de la Vida Humana en el Mar (SOLAS). Consultado el 3 de mayo de 2024 del *Convenio Internacional para la Seguridad de la Vida Humana en el Mar (SOLAS), 1974 (imo.org)*

### 3 Contexto político actual para los contenedores refrigerados

el Convenio SOLAS estipula las normas para el diseño, la construcción y el funcionamiento de los buques, con miras a garantizar un daño ambiental mínimo. La OMI se ha fijado el ambicioso objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero del sector refrigerado en un 50% para 2050, en línea con los objetivos del Acuerdo de París sobre el cambio climático.

Otro acuerdo internacional destacable es el Reglamento sobre gases fluorados de la Unión Europea, cuya última actualización, (UE) 2024/537, aprobada el 7 de febrero de 2024.<sup>42</sup> Este reglamento sirve para modificar la directiva anterior sobre gases fluorados de efecto invernadero (gases fluorados), incluido el R134a, un refrigerante predominante en las unidades de refrigeración. El Reglamento introduce una serie de medidas, entre ellas el establecimiento de un sistema de proporciones para los HFC, la imposición de prohibiciones adicionales, un calendario de eliminación revisado y la aplicación de normas más estrictas para la prevención de emisiones. También implica medidas mejoradas de control y aplicación para la aplicación de estas nuevas regulaciones. Este Reglamento es un paso sustancial hacia la consecución de los objetivos de neutralidad climática de la UE de aquí a 2050.

Los refrigerantes clasificados como gases fluorados también se clasifican como sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas (PFAS), también conocidas como “sustancias químicas eternas” en la legislación europea. Una proporción significativa de refrigerantes, en particular R134a y R1234yf, se descomponen en ácido trifluoroacético (TFA), un tipo específico de PFAS caracterizado por una estructura de cadena ultracorta. Estas sustancias son absorbidas por los suelos o los cuerpos de agua, entrando así en el ciclo del agua.

Los PFAS se han detectado en fuentes de agua potable y, una vez ingeridos, son difíciles de eliminar del cuerpo. La omnipresencia de PFAS en el ambiente tiene el potencial de plantear riesgos significativos para la salud de los seres humanos. A la luz de estas preocupaciones, la Agencia Europea de Sustancias y Mezclas Químicas (ECHA) ha propuesto la prohibición de todos los PFAS en virtud del reglamento REACH de la UE.<sup>43</sup> La propuesta ya ha recibido una serie de comentarios, que actualmente están siendo evaluados y discutidos por los comités de la ECHA. Estaba previsto que estos comentarios concluyeran a finales de 2024.<sup>44</sup>

Se ha demostrado que el enfoque de enfriamiento verde, promovido por GIZ Proklima, reduce las emisiones de GEI del sector de refrigeración, aire acondicionado y bombas de calor (RACHP), minimizando así el impacto ambiental. El enfoque está alineado con los compromisos internacionales y enfatiza el uso de tecnología de alta eficiencia energética que funciona con refrigerantes naturales.

El sector de la refrigeración, aunque es un nicho, ha sido identificado como una fuente de oportunidades para mejorar y alinearse con los compromisos internacionales. Si bien aún no se ha determinado el impacto preciso, se prevé que el diseño, la producción y el uso de los contenedores refrigerados se verán influenciados por uno o más de los acuerdos descritos. Por lo tanto, el momento actual se considera óptimo para fomentar la innovación en nuevas alternativas refrigeradas, con miras a mejorar la eficiencia y el aislamiento térmico, utilizando refrigerantes naturales.

42 EUR-Lex (2024). Reglamento (UE) 2024/537 sobre los gases fluorados de efecto invernadero, por el que se modifica la Directiva (UE) 2019/1937 y se deroga el Reglamento (UE) n.º 517/2014. Consultado el 3 de mayo de 2024 de [Reglamento - UE - 2024/537 - EN - EUR-Lex \(europa.eu\)](https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/537/en)

43 Agencia Europea de Sustancias y Mezclas Químicas (2023, 22 de marzo). ANEXO XV INFORME SOBRE RESTRICCIONES - PROPUESTA DE RESTRICCIÓN. Consultado el 3 de mayo de 2024 del [Anexo XV formato de informe 040615 \(europa.eu\)](https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/537/en)

44 ECHA. (2024, 13 Marzo). Próximos pasos para la propuesta de restricción de PFAS. Consultado el 14 Mayo, 2024, de [All news - ECHA \(europa.eu\)](https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/537/en)

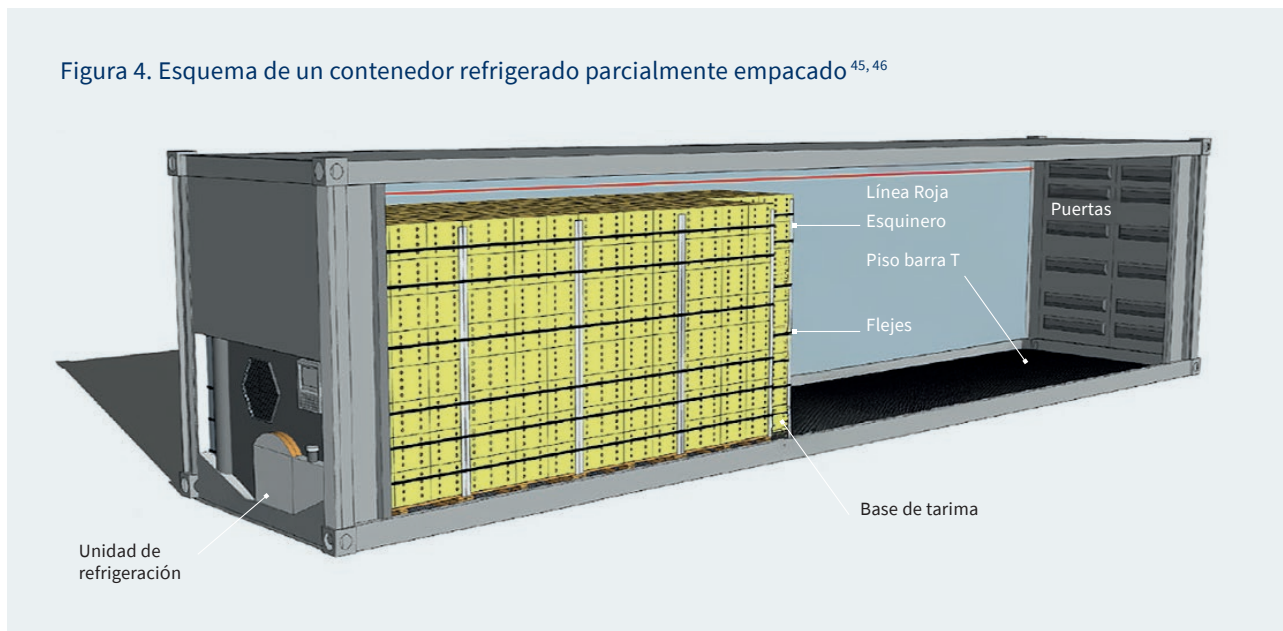
# 4 Tecnologías y refrigerantes de contenedores refrigerados

Hoy en día, la gran mayoría de los productos se transportan a mercados distantes mediante medios intermodales (es decir, una combinación de transporte por carretera, marítimo y ferroviario). Los contenedores de carga refrigerados, también conocidos como contenedores refrigerados, se emplean para preservar los productos sensibles a la temperatura durante el transporte global.

Los contenedores de carga refrigerados o contenedores de refrigeración mecánica (reefers), están compuestos por dos componentes: un contenedor con aislamiento térmico (caja) y una unidad de refrigeración mecánica (unidad de refrigeración, sistema de refrigeración). Es imperativo que los usuarios consideren el contenedor refrigerado como un sistema, particularmente al tomar decisiones sobre el aislamiento y el tamaño del equipo.

Los contenedores de carga refrigerados suelen estar equipados con una sola unidad que constituye toda la pared frontal del contenedor. La unidad de refrigeración tiene aproximadamente 400 mm de profundidad y proporciona estructura y aislamiento a la pared frontal del contenedor. El sistema de refrigeración utiliza un ciclo de compresión de vapor, y los motores del compresor y del ventilador, los calentadores de resistencia y los controles operativos funcionan con una fuente de electricidad externa. Por lo general, se utiliza el suministro de aire inferior. También es de destacar que la unidad puede ir acompañada de un conjunto motor-generador diésel desmontable, que está equipado con un depósito de combustible integral, para viajar por tierra.

Figura 4. Esquema de un contenedor refrigerado parcialmente empacado <sup>45,46</sup>



45 Los contenedores refrigerados suelen estar disponibles en tres longitudes: 20 pies, 40 pies y cubo de 40 pies de alto (con un techo más alto).

46 Lukasse, L., et al. (2023). Perspectivas sobre la evolución de los contenedores refrigerados para el transporte de productos frescos.

## 4 Tecnologías y refrigerantes de contenedores refrigerados

De acuerdo con la norma MH5.1.1.5 del Instituto Nacional Estadounidense de Normas (ANSI) y la norma ISO 668, los contenedores de carga suelen tener 2,4 m de ancho, 2,4 a 2,9 m de alto y 6,1 o 12,2 m de largo. Tienen puertas batientes en un extremo para cargar el cargamento y para acceder al interior. Los contenedores tienen accesorios de esquina estándar para asegurarlos a embarcaciones, vagones de ferrocarril y vehículos de carretera. Las dimensiones exteriores de estos contenedores también se rigen por las mismas normas. El sistema de refrigeración está compuesto por el compresor, los ventiladores, el sistema de control y monitoreo y el refrigerante.<sup>47,48</sup> Los compresores recíprocos y de espiral se utilizan en unidades de refrigeración para contenedores refrigerados. Los compresores de espiral tienen la ventaja de tener menos partes móviles, ser más livianos y compactos, y ser más eficientes con bajas relaciones de compresión. Dependiendo del modo de falla, también se pueden reparar, provisto con un sistema de alerta para alertar en caso de condiciones inaceptables.

Los compresores recíprocos tienen la ventaja de que pueden repararse y renovarse, y también tienen una cadena de suministro bien conocida. Los convertidores de frecuencia (inversores) generalmente se usan para alimentar los compresores para controlar la cantidad de aire que hay, lo que ahorra energía. Para evitar el deterioro durante el transporte, hay suficiente circulación de aire acondicionado alrededor de la carga para eliminar el calor que se ha transferido al espacio de carga. Esto se hace mediante la conducción e infiltración de aire fresco. Hay un espacio libre entre la parte superior de la carga y el techo, y el piso tiene barras en T fijas (piso en T). El aire se suministra en la parte inferior de la carga a través del piso en T (ver Figura 4).

En un sistema de suministro de aire inferior, es importante mantener la presión de aire debajo de la carga. Los productos transpirables deben empacarse en cajas de cartón con rejillas de ventilación superior e inferior alineadas para permitir que el aire acondicionado fluya y elimine el calor. La técnica de carga adecuada es esencial para mantener una buena circulación de aire alrededor de la carga y evitar el deterioro, y los contenedores parcialmente cargados presentan problemas particulares de enfriamiento.<sup>50,51</sup>

Las funciones de un sistema de control de contenedores refrigerados incluyen control de temperatura, descongelación y seguridad.

La temperatura de retorno o suministro del aire de carga (y a veces ambas), se monitorea y controla termostáticamente. Además, los contenedores refrigerados utilizan modos aún más eficientes, como la velocidad de accionamiento variable o las soluciones de modulación de frecuencia. La eficiencia de los contenedores refrigerados se ve directamente afectada por las técnicas de regulación.

Las funciones del sistema de control de equipos también pueden incluir lo siguiente:

- Monitorización y visualización de parámetros operativos importantes como el suministro y el retorno de aire, así como los niveles de humedad relativa, CO, CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> para el modo “Atmósfera controlada”.
- Registro de datos de parámetros de rendimiento del equipo.
- Alarmas y sistema de alerta en caso de condiciones inaceptables.

47 ASHRAE (2010), MANUAL DE REFRIGERACIÓN, Edición SI Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado, Inc.

48 Ver también ISO1496-2:2018

49 Ibid.

50 Ibid.

51 McGregor, Brian (1987) Manual de transporte de productos tropicales, Departamento de Agricultura de EE.UU.

## 4 Tecnologías y refrigerantes de contenedores refrigerados

- Control de temperatura para la temperatura interior (Tset), por ejemplo, para la temperatura de la pulpa de productos básicos.
- Para mejorar el ahorro de combustible, proporcionando señales de parada y arranque al equipo accionado por el motor, dependiendo de la demanda de refrigeración o calefacción.
- Ajuste de la capacidad del sistema para que coincida con la fuente de alimentación del motor durante el arranque y las diferentes temperaturas ambiente.
- Monitorear y controlar la química atmosférica y la humedad relativa del espacio de carga, como los niveles de CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y, a veces, etileno.

Muchas de estas funciones del sistema de control son realizadas por microprocesadores. Estos mejoran la respuesta del equipo a diferentes condiciones de funcionamiento, como la temperatura ambiente. Su capacidad para almacenar datos facilita la comprobación del funcionamiento de los equipos antes de su uso, y permite realizar un seguimiento del rendimiento de los equipos y analizar los posibles fallos. Los microprocesadores también se pueden usar con telemetría inalámbrica para permitir una ubicación central para monitorear el punto de ajuste del termostato, la temperatura del aire de retorno y suministro, el modo de funcionamiento y el estado de la alarma.

Los fabricantes de equipos utilizan pruebas de inspección previa al viaje (PTI) para determinar si el equipo cumple con los criterios de diseño para su funcionamiento. Los usuarios de equipos pueden desear guiarse por pruebas de que se han completado con éxito las pruebas apropiadas o pueden considerar pruebas específicas.

El consumo de energía de un contenedor mecánicamente refrigerado se puede realizar de acuerdo con la norma ISO 1496-2:2018 con las siguientes condiciones

de prueba: temperatura ambiente de 25 °C y tres puntos de ajuste de temperatura dentro del contenedor: 14 °C, 0 °C y -18 °C. La capacidad de enfriamiento o capacidad de refrigeración de un contenedor refrigerado mecánico generalmente se realiza a una temperatura ambiente de 38 °C en América del Norte y 30 °C en Europa, con los siguientes puntos de ajuste en la bodega de carga: 2 °C, -18 °C y -29 °C en América del Norte y 0 °C y -20 °C en Europa.<sup>52</sup>

Por lo general, se realiza una prueba funcional de un contenedor refrigerado mecánicamente a altas temperaturas ambientales de acuerdo con la norma ISO 2018. Las condiciones de prueba incluyen una temperatura ambiente de 50 °C, con los puntos de ajuste de retención establecidos en 12 °C, -30 °C y/o el punto de ajuste más bajo que puede alcanzar la unidad de refrigeración mecánica.

### 4.1 Refrigerantes en contenedores refrigerados

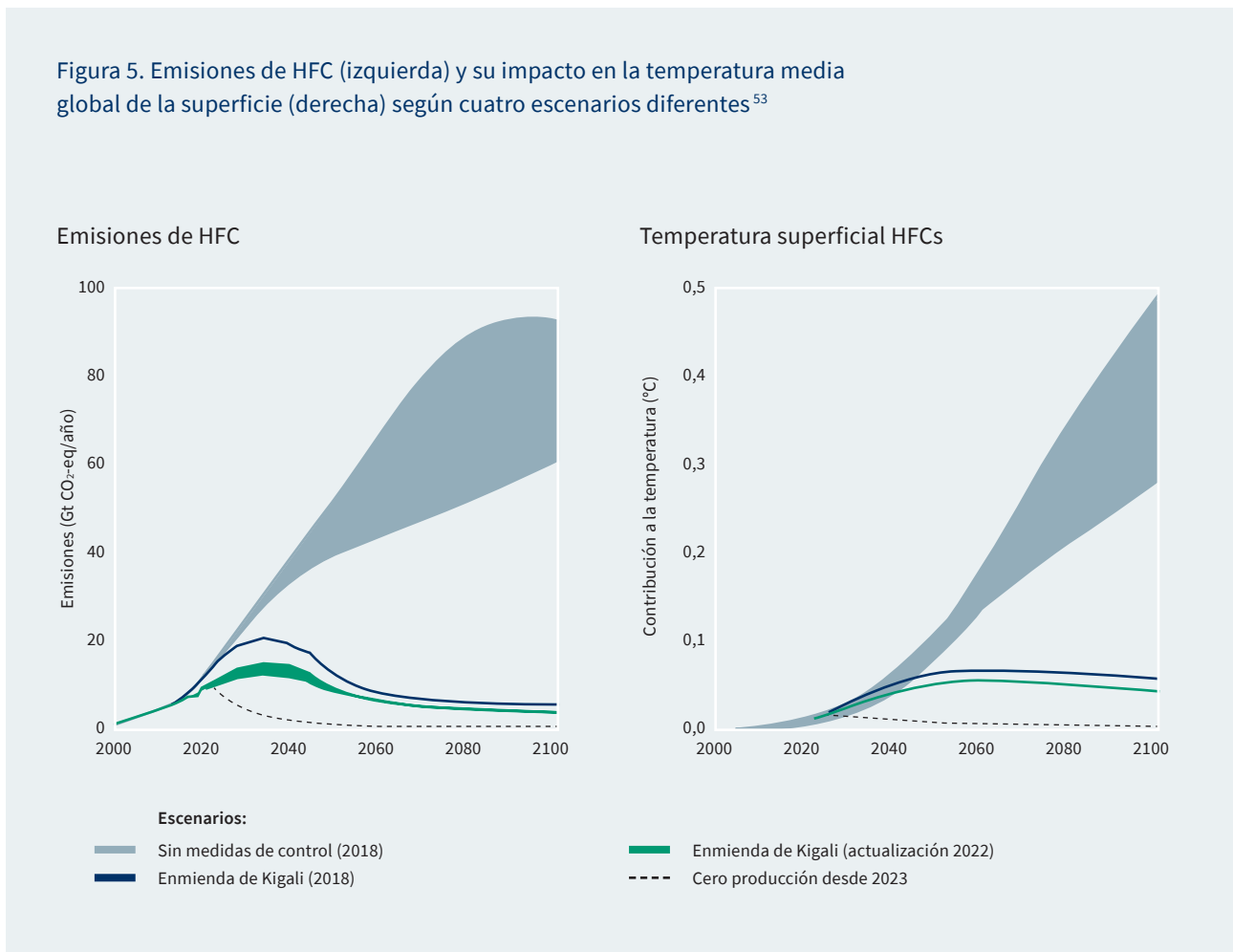
El sector de la refrigeración y el aire acondicionado (RAC) es responsable de una proporción significativa de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, directamente a través del uso de refrigerantes de alto GWP e indirectamente a través de la cantidad de energía que utilizan las diferentes unidades. La transición a refrigerantes de GWP ultra bajo, como lo tienen los refrigerantes naturales como propano, amoníaco y dióxido de carbono, es fundamental para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mitigar el impacto en el ambiente y la naturaleza.

La reducción de la producción y las emisiones de HFC es un paso fundamental para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mitigar los impactos en el ambiente y la salud humana, en consonancia con los objetivos del Protocolo de Montreal y su Enmienda de Kigali.

<sup>52</sup> ASHRAE (2010), MANUAL DE REFRIGERACIÓN, Edición SI Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado, Inc.

## 4 Tecnologías y refrigerantes de contenedores refrigerados

Figura 5. Emisiones de HFC (izquierda) y su impacto en la temperatura media global de la superficie (derecha) según cuatro escenarios diferentes<sup>53</sup>



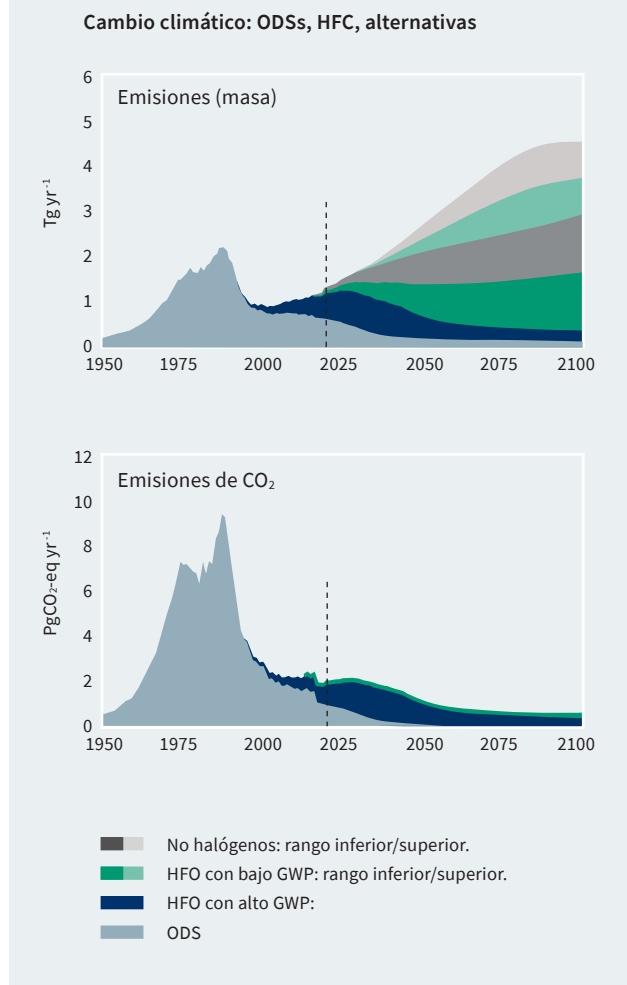
La Figura 5 ilustra el impacto potencial que podría evitarse siguiendo el cronograma presentado en la Figura 3 en el Capítulo 3. Si no se toman medidas de control sobre las emisiones de HFC para 2100, habrá de 6 a 9 Gt de CO<sub>2</sub>eq por año, y la contribución a la temperatura media mundial de la superficie estará entre 0,3 K y 0,5 K.

Las áreas azul oscuro y verde en los gráficos ilustran las emisiones y las contribuciones proyectadas a la temperatura promedio global de la superficie, según el escenario propuesto en la Enmienda de Kigali en 2018 y su última actualización en 2022. El último escenario (a partir de 2022) incorpora una serie de factores, incluidos los controles nacionales sobre el consumo y

<sup>53</sup> Organización Meteorológica Mundial (OMM). Evaluación científica del agotamiento de la capa de ozono: 2022.

## 4 Tecnologías y refrigerantes de contenedores refrigerados

Figura 6. Contribuciones históricas y proyectadas al cambio climático de las ODSs, los HFC de alto PCA, los HFO de bajo PCA y las alternativas no halogenadas, suponiendo el pleno cumplimiento de las disposiciones del Protocolo de Montreal, incluida la Enmienda de Kigali<sup>54</sup>



la producción de hidrofluorocarbonos (HFC) en países que no operan al amparo del artículo 5, el menor consumo notificado en China, la información histórica actualizada sobre el uso de HFC en países que no operan al amparo del artículo 5, las proporciones de mezcla observadas hasta 2020 como una limitación, y los supuestos sobre la reducción del uso de HFC para la refrigeración comercial e industrial. El estudio asume además que todos los países cumplirán con la Enmienda de Kigali (ver Figura 5).

El uso de alternativas de bajo GWP dentro del sector RAC ha resultado en una disminución de las emisiones equivalentes y su forzamiento radiativo asociado. Esto es a pesar de un aumento en las emisiones masivas a la atmósfera, atribuible al crecimiento del sector. En los últimos años, algunos sectores, en particular la refrigeración comercial, han adoptado refrigerantes naturales como medio para reducir las emisiones directas de gases de efecto invernadero y mitigar los impactos ambientales. Otras alternativas de bajo GWP en uso incluyen nuevas mezclas de refrigerantes HFC con hidrofluoroolefinas (HFO) o, en algunos casos, refrigerantes naturales. También se han utilizado HFO, especialmente en la industria automotriz. El R1234yf, un HFO, se considera actualmente una alternativa prometedora para una amplia gama de aplicaciones.

Sin embargo, cabe señalar que los HFC y los HFO se clasifican como PFAS (productos químicos eternos o permanentes) y se propone que se prohíban en virtud de la propuesta de la ECHA para REACH. La degradación atmosférica de los HFC da lugar a la formación de TFA y se ha identificado como una fuente importante de TFA en el ambiente.<sup>55</sup> Un estudio reciente de núcleos de hielo muestra un aumento de la deposición de TFA, ácido perfluoropropanoico (PFPrA) y ácido perfluorobutanoico (PFBA) desde 1990,<sup>56</sup> y se prevé que los niveles ambientales de TFA aumentarán en el futuro como

<sup>54</sup> Ibid.

<sup>55</sup> Kotamarthi, V.R, et al. (1998), Ácido trifluoroacético de la degradación de HCFC y HFC: un estudio de modelado tridimensional. *J. Geophys. Res. Atmos.*

<sup>56</sup> Pickard, H.M, et al. (2020), Registro de núcleos de hielo de ácidos alquilados fluorados de cadena corta persistentes: evidencia del impacto de las regulaciones ambientales globales. *Geophys. Res. Lett.*

## 4 Tecnologías y refrigerantes de contenedores refrigerados

resultado de un cambio de HFC a HFO. El TFA ha sido identificado como un teratógeno, capaz de atravesar la barrera placentaria y bioacumularse en el líquido fetal y amniótico de las ratas, además de estar presente en la leche materna de los monos. La experimentación adicional ha llevado al descubrimiento de malformaciones oculares persistentes en conejos. Los posibles efectos tóxicos para la reproducción en los seres humanos de estos gases requieren un mayor estudio. Ya existe un historial de experimentos que están tratando de determinar una IDA (ingesta diaria aceptable) para los seres humanos, y estos primeros resultados indican que la exposición actual, así como las concentraciones de TFA que se encuentran en el ambiente aún están lejos de ser un riesgo para la salud, sin embargo, la presencia y las emisiones de TFA están aumentando.<sup>57</sup>

La emisión de TFA no ha sido objeto de un seguimiento exhaustivo en muchos países; sin embargo, hay datos suficientes para distinguir y modelar las fuentes más probables de TFA. Una gran cantidad de publicaciones han indicado que la fuente de TFA es predominantemente antropogénica, incluida la liberación directa de procesos industriales específicos en plantas químicas, de la gestión de desechos municipales e industriales y de la deposición atmosférica de refrigerantes y espumas.<sup>58</sup> Se ha comprobado que las emisiones de fuentes naturales, como los respiraderos hidrotermales y los procesos microbianos en el océano, son insignificantes en comparación con las fuentes antropogénicas.<sup>59</sup> Ya se han hecho proyecciones sobre las futuras emisiones de TFA, en particular las resultantes de la deposición

Tabla 3. Tasa de producción anual proyectada de TFA debido a la conversión atmosférica de R134a y R1234yf<sup>61</sup>

	R134a	R1234yf	Total
<b>Formación anual de TFA (Tg/año)</b>			
<b>2020</b>	0,01–0,03	0,03–0,03	0,04–0,06
<b>2050</b>	0,02–0,05	0,34–0,49	0,36–0,54
<b>2100</b>	0,01–0,02	0,63–1,03	0,64–1,05
<b>Suma de TFA depositado (Tg)</b>			
<b>2020–2050</b>	0,5–1,5	5,3–6,6	5,8–8,1
<b>2020–2100</b>	1,0–2,9	30,5–49,0	31,5–51,9

atmosférica de refrigerantes. La mayoría de estas proyecciones indican que la absorción de sustancias como el R1234yf podría dar lugar a una alteración significativa de las proyecciones futuras.<sup>60</sup>

Los refrigerantes constituyen un componente importante para el aislamiento del contenedor, dada su capacidad para funcionar como agentes espumantes, también conocidos como espumas. Los HCFC y HFC se han empleado para ambos fines. De conformidad con las disposiciones del Protocolo de Montreal, el uso de HCFC se ha eliminado de manera efectiva, mientras que los HFC se siguen empleando como refrigerantes.

57 Brunn, H., Arnold, et al. (2023). PFAS: Sustancias químicas para siempre: persistentes, bioacumulables y móviles. Revisar el estado y la necesidad de su eliminación gradual y remediación de sitios contaminados

58 Freeling, F. y Björnsdotter, M. K. (2023). Evaluación de la presencia ambiental del contaminante antropogénico ácido trifluoroacético (TFA).

59 Umweltbundesamt (Agencia Alemana de Medio Ambiente) (2021). Reducción de la entrada de productos químicos en las aguas: trifluoroacetato (TFA) como sustancia persistente y móvil con muchas fuentes (ISSN 2363-829X).

60 Wang et al. Estimación de una deposición límite superior de 59.71 Gg año<sup>-1</sup> para TFA de HFO-1234yf.

61 Organización Meteorológica Mundial (OMM). Evaluación científica del agotamiento de la capa de ozono: 2022.

## 4 Tecnologías y refrigerantes de contenedores refrigerados

Se han logrado avances significativos en ciertos sectores de la industria RACHP mediante la adopción de ciclopentano, una espuma HC con un GWP excepcionalmente bajo (<1).

Ya no se permite que el aislamiento de los nuevos contenedores refrigerados en Europa contenga HFC o HCFC como agentes espumantes. Una situación similar está ocurriendo en otras partes del mundo, donde estos agentes también están siendo eliminados. Sin embargo, la flota de contenedores refrigerados más antigua continúa usando R141b como agente de soplado de espuma. Dos alternativas principales para este agente espumante son R365mfc y R245fa.<sup>62,63</sup> La implementación de ambas alternativas como reemplazo es sencilla, sin necesidad de alteraciones significativas en la etapa de procesamiento de la espuma. Además, las formulaciones se han optimizado para garantizar una relación costo-rendimiento óptima.<sup>64</sup> Se ha demostrado que el ciclopentano, un agente espumante económico, produce espumas de baja densidad con baja conductividad térmica y buenas propiedades mecánicas.<sup>65</sup> Sin embargo, es una sustancia inflamable que requiere una inversión para manejarla de manera segura. La cuarta generación de agentes espumantes, incluidos HFC-LBA y FEA-1100, surgió en 2013. Estos agentes se caracterizan por su potencial de agotamiento de la capa de ozono cero y un potencial de calentamiento global inferior a 10, lo que sugiere un impacto ambiental mínimo. En 2020, se lograron importantes resultados de investigación con el agente espumante FEA-1100. Sin embargo, es importante tener en cuenta que FEA-1100 es un HFO y podría considerarse dentro de la definición de PFAS.

Para llevar a cabo una evaluación exhaustiva de los refrigerantes, es imperativo considerar su GWP tanto a corto plazo (hasta 20 años) como a largo plazo (hasta

100 años). Además, la evaluación de la inflamabilidad debe cumplir con los estándares descritos en la Norma 34 de la Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE), que clasifica los refrigerantes como A1 (no inflamable), A2L (menor inflamabilidad), A2 (inflamabilidad leve) o A3 (inflamable).<sup>66</sup>

Al considerar el riesgo de PFAS, es esencial considerar la presencia de PFAS/TFA en la composición del refrigerante. La Tabla 2 proporciona especificaciones para refrigerantes conocidos que se pueden usar en contenedores refrigerados o que se consideran alternativas.

La importancia de las PFAS para la industria queda demostrada por los más de 5.600 comentarios sobre la propuesta de restricción de PFAS de la UE por parte de más de 4.400 organizaciones, empresas e individuos, según lo informado por la ECHA.<sup>67,68</sup> Debido al número de comentarios, está previsto que el proceso entre en vigor en 2029.

Como se ilustra en la Tabla 4, se especifica la participación de mercado actual del uso de refrigerantes en la flota mundial de contenedores refrigerados. Es evidente que los refrigerantes HFC R134a y R404A dominan el mercado. Las alternativas ya presentes para estos refrigerantes incluyen la mezcla de HFC / HFO R513A (que reemplaza al R134a) o R1234yf, y R452A (que reemplaza al R404A).

Cabe destacar que el R23, a pesar de su limitada participación de mercado, también está presente. Este refrigerante se utiliza en modelos que permiten temperaturas ultrabajas de hasta -70 °C para cargas críticas como viales, ingredientes farmacéuticos activos (API) y enzimas, pero especialmente para el transporte de

62 Lundsgaard, C. A., et al. (2020). Estudio preparatorio sobre Contenedores Refrigerados: Informe de las Tareas 1 y 2. En Estudio preparatorio sobre contenedores refrigerados: Informe de las tareas 1 y 2.

63 Wang, Y., et al. (2022). Previsión de tendencias tecnológicas y descubrimiento de oportunidades tecnológicas basadas en la minería de textos: el caso de la tecnología de contenedores refrigerados.

64 R, L., T, M. Y N, M. (2015). Agentes espumantes de aislamiento de bajo GWP y métodos de medición de la eficiencia.

65 Wang, Zhiguo, Chengzhu Wang, Yuebin Gao, Zhao Li, Yu Shang y Haifu Li. 2023. "Materiales de espuma de poliuretano de aislamiento térmico poroso" *Polímeros* 15, no. 18: 3818.

66 ASHRAE (2022). Norma 15-2022 ANSI/ASHRAE. Norma de seguridad para sistemas de refrigeración. Consultado el 3 de mayo de 2024, de *ASHRAE 15-2022 (packaged w/Standard 34-2022)* | ASHRAE Store ([accuristech.com](https://www.ashrae.org/standards))

67 *Todas las noticias* - ECHA

68 *¿Los PFAS son para siempre?* | Observatorio Europeo Corporativo

## 4 Tecnologías y refrigerantes de contenedores refrigerados

pescado. Se estima que entre 5.000 y 10.000 contenedores refrigerados operan a  $-60^{\circ}\text{C}$ . Estas unidades están equipadas con un sistema de refrigeración en cascada, que comprende R134a en el lado de alta temperatura y R23 en el lado de baja temperatura.<sup>69</sup> El R473A se con-

sidera un sustituto del R23. A pesar de su capacidad de enfriamiento superior, el R473A exhibe un mayor consumo de energía a una capacidad de enfriamiento determinada, principalmente debido a su reducida eficiencia volumétrica e isentrópica.

### Los refrigerantes de alto GWP enfrentan precios elevados ya que las alternativas naturales ofrecen estabilidad.

El Reglamento de la UE sobre gases fluorados entró en vigor en marzo de 2024. Ha establecido objetivos ambiciosos para la eliminación gradual de los HFC, lo que ha llevado a un aumento dramático en los precios de los refrigerantes convencionales, que han aumentado hasta en un 1.000% desde sus niveles de 2014 de 3-5 EUR/kg.<sup>70</sup> Por el contrario, los precios de los refrigerantes alternativos se han mantenido estables desde 2020, según la consultora ambiental alemana Öko-Recherche. Actualmente, los refrigerantes con un alto GWP tienen un precio de 30-45 EUR/kg en varios proveedores europeos, con precios que aumentan constantemente desde 2014. En comparación, alternativas como el propano (R290) y el dióxido de carbono (R744) siguen siendo considerablemente más baratas (~5-15 EUR/kg).

Otro factor que impulsa el aumento de los precios de los refrigerantes son las discusiones en curso en la UE sobre la regulación de los "productos químicos eternos", como las sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas (PFAS). Se sabe que todos los refrigerantes, excepto los naturales como R290, R744 y R32, se descomponen en PFAS. Esto puede conducir a nuevos aumentos de precios para refrigerantes como el R1234yf, que se usa en automóviles y se está considerando como una alternativa.

Aunque estas tendencias de precios son más notables en el mercado europeo, se espera que afecten a otras regiones debido a los compromisos globales con el Protocolo de Montreal y su Enmienda de Kigali. Si bien el mayor costo inicial de los refrigerantes más ecológicos puede ser una barrera, generalmente ofrecen al menos un 10% más de eficiencia (por ejemplo, R290 frente a R404A), lo que resulta en un menor consumo de energía y menores costos de electricidad. Además, el uso de refrigerantes naturales, como los hidrocarburos, fomenta una disminución en las tasas de fuga de los dispositivos de enfriamiento, lo que reduce la necesidad de recargas. Los aumentos de precios de los refrigerantes ya están influyendo en las políticas actuales y futuras destinadas a promover soluciones de refrigeración más sostenibles.

<sup>69</sup> El R1150 (etileno), un hidrocarburo con un GWP de 4, también se puede utilizar para aplicaciones a baja temperatura ( $< -70^{\circ}\text{C}$ ).

<sup>70</sup> Documento de referencia de la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) 24.02.2024 Resultados de la encuesta trimestral: Informes del trimestre 4/2024 Gases fluorados de efecto invernadero - Acción por el clima

## 4 Tecnologías y refrigerantes de contenedores refrigerados

Tabla 4. Lista de valores de GWP, inflamabilidad y presencia de PFAS de refrigerantes y espumas seleccionados (se resalta la alternativa sin PFAS utilizada en contenedores refrigerados) <sup>71, 72, 73, 74, 75, 76</sup>

Refrigerante / Espuma	Tipo	Composición	Alternativa para <sup>77</sup>	Participación en Mercado (%) <sup>78</sup>	GWP 20 años	GWP 100 años	Inflamabilidad	PFAS	TFA (hasta %)
R141b	HCFC	Puro	-	-	2170	860	A1	No	No
R23	HFC	Puro	R13	-	12400	14600	A1	No	No
R134a	HFC	Puro	R12, R22	97,80	4140	1530	A1	Sí (R134a)	R134a (20%)
R404A	mezcla HFC	R143a (52%), R125 (44%), R134a (4%)	R22, R502	1,68	7208	4728	A1	Sí (R143a, R125, R134a)	R143a (10%), R134a (20%)
R452A	mezcla HFC/HFO	R125 (59%), R1234yf (30%), R32 (11%)	R404A, R507A	0,18	4303	2292	A1	Sí (R125, R1234yf)	R1234yf (100%)
R473A	mezcla HFC/HFO/CO <sub>2</sub>	R744 (60%), R1132a (20%), R23 (10%), R125(10%)	R23	-	1915	1835	A1	Sí (R125)	No
R245fa	HFC	Puro	R141b	-	3170	962	A1	No	No
R365mfc	HFC	Puro	R141b	-	2920	914	A1	No	No
R513A	mezcla HFC/HFO	R1234yf (56%), R134a (44%)	R134a	0,03	1823	673	A1	Sí (R1234yf, R134a)	R1234yf (100%), R134a (20%)
R454A	mezcla HFC/HFO	R1234yf (65%), R32 (35%)	R404A	-	1037	270	A2L	Sí (R1234yf)	R1234yf (100%)
R1234yf	HFO	Puro	R407A, R410A, R134a	-	1,81	0,501	A2L	Sí (R1234yf)	R1234yf (100%)
R744	CO <sub>2</sub>	Puro	R134a, R404A, R407A, R410A, R22	0,31	1	1	A1	No	No
R290	HC Propano	Puro	R134a, R404A, R407A, R410A, R22, R502	-	0,072	0,02	A3	No	No
R717	Amoníaco	Puro	R134a, R404A, R407A, R410A, R22	-	<1	<<1	B2L	No	No
	Ciclopentano	Puro	R141b	-	<<1	<<1	A3	No	No

71 Foster, P. et al., 2021: El presupuesto energético de la Tierra, las retroalimentaciones climáticas y el material complementario de sensibilidad climática. En Cambio Climático 2021: La base de la ciencia física. Contribución del Grupo de Trabajo I al sexto informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

72 Organización Meteorológica Mundial (OMM). Evaluación científica del agotamiento de la capa de ozono: 2022.

73 Everitt, N. (2023, Febrero 13). La prohibición de PFAS afecta a la mayoría de las mezclas de refrigerantes. Publicación de enfriamiento.

74 Behringer, D., et al. (2021). Productos de degradación persistentes de refrigerantes halogenados y agentes espumantes en el medio ambiente: tipo, concentraciones ambientales y destino, con especial atención a los nuevos sustitutos halogenados con bajo potencial de calentamiento atmosférico (ISSN 1862-4804). Agencia Alemana para el Medio Ambiente.

75 Refrigerantes. (n.d.). Linde (anteriormente AGA) Gases Industriales.

76 Asociación de Propietarios de Contenedores, COA, & COA Reefer Forum Work Group. (2022). CONTENEDORES REFRIGERADOS: CUESTIONES REGLAMENTARIAS RELATIVAS A LOS GASES FLUORADOS REFRIGERANTES.

77 Las alternativas se aplican a otras aplicaciones. No solo contenedores refrigerados.

78 Investigación de alimentos y base biológica de Wageningen, Certificación ATO de contenedores refrigerados, Universidad e Investigación de Wageningen, accedido 15 febrero 2024, *Reefertransport - Home*. Promedios de los últimos cinco años. Los refrigerantes marcados con un "-" son prospectos y están en desarrollo, no están disponibles en el mercado o no se encontraron cifras significativas.

## 4 Tecnologías y refrigerantes de contenedores refrigerados

### 4.2 Los desafíos de la inflamabilidad

La norma ISO 20854 proporciona el marco para el uso de refrigerantes inflamables (actualmente clasificados como A2, A2L, A3 por la norma ISO 817:2014) en contenedores marítimos.<sup>79</sup> Se están llevando a cabo debates sobre el posible uso futuro de HFO-1234yf y R290 en este contexto.<sup>80</sup>

A pesar de la ausencia de una solución comercial que emplee refrigerantes inflamables, la plétora de estudios científicos relevantes presentados en conferencias recientes sobre la gestión de la inflamabilidad para aplicaciones de transporte es indicativa de una investigación y desarrollo sustanciales en este campo. König et al. (2014)<sup>81</sup> han demostrado que la frecuencia de los peligros y la probabilidad de muertes para la flota mundial de contenedores refrigerados se reducirían a menos de 10<sup>-6</sup> (incluido el error humano) si se implementaran cambios de diseño adecuados y se establecieran pautas de mejores prácticas. Cabe destacar que el sector marítimo tiene una amplia experiencia en el manejo y transporte de sustancias altamente inflamables, incluidos queroseno, metano, gas natural licuado (GNL) y propano.

Además, en el sector del aire acondicionado móvil (MAC), el R290 se utiliza con éxito en la tecnología de camiones y remolques para el transporte de productos perecederos, y también para soluciones de transporte público y productos farmacéuticos.<sup>82</sup>

Un artículo de König, Bararu y Holtappels examina la eficiencia energética de varias opciones de reemplazo para contenedores o camiones/remolques y describe tres enfoques de diseño distintos para abordar los riesgos de inflamabilidad.<sup>83</sup>

El documento describe tres enfoques de mitigación: en primer lugar, minimizar las juntas, incorporar componentes a prueba de fugas y agregar sensores, válvulas de cierre, enclavamientos de puertas y alarmas; en segundo lugar, implementar un diseño de circuitos múltiples para limitar la carga de refrigerante asociada con posibles fugas; y en tercer lugar, utilizar un ciclo indirecto con un fluido no inflamable en el bucle secundario.

A pesar de que los fabricantes han expresado interés en desarrollar un frigorífico R290 en los últimos años, actualmente no hay ningún modelo de este tipo disponible en el mercado. El principal desafío parece ser la implementación del proceso requerido de Evaluación de Riesgos en Modo Operativo (OMRA) para evaluar los riesgos en las diversas etapas de la operacionalización.

Sin embargo, recientemente ha surgido una nueva norma, especificaciones técnicas e informes técnicos que se centran en el uso seguro de refrigerantes inflamables. Específicamente, ISO 20854: 2019 detalla las prácticas óptimas de la industria para la operación segura de refrigerantes inflamables en sistemas de refrigeración empleados en contenedores marítimos, que operan a bordo de barcos, terminales y carreteras, ferrocarriles y tierra.<sup>84</sup>

79 ISO. (2019). ISO 20854:2019: Contenedores térmicos — Norma de seguridad para sistemas de refrigeración que utilizan refrigerantes inflamables — Requisitos de diseño y funcionamiento. Consultado el 21 de junio de 2024 de *ISO 20854:2019 - Contenedores térmicos — Norma de seguridad para sistemas de refrigeración que utilizan refrigerantes inflamables — Requisitos de diseño y operación*

80 Asociación de Propietarios de Contenedores, COA, & COA Reefer Forum Work Group. (2022). CONTENEDORES REFRIGERADOS: CUESTIONES REGLAMENTARIAS RELATIVAS A LOS GASES FLUORADOS REFRIGERANTES.

81 König, H., Bararu M. (2014). Evaluación de riesgos para contenedores refrigerados con refrigerantes inflamables. 11ª Conferencia IIR Gustav Lorentzen sobre Refrigerantes Naturales *Evaluación de riesgos para contenedores refrigerados con refrigerantes inflamables*. ID109

82 *Presentaciones - Transporte refrigerado - ATMO Europa 2024*

83 König, H., Bararu, M., & Holtappels, K. (2016). Practical tests with R290 used in reefer container refrigeration leakage testing. 12th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants. *Practical tests with R290 used in reefer container refrigeration leakage testing*. - pap. 1138

84 ISO. (2019). ISO 20854:2019: Contenedores térmicos — Norma de seguridad para sistemas de refrigeración que utilizan refrigerantes inflamables — Requisitos de diseño y funcionamiento. Extraído el 21 Junio, 2024, de *ISO 20854:2019 - Contenedores térmicos — Norma de seguridad para sistemas de refrigeración que utilizan refrigerantes inflamables — Requisitos de diseño y funcionamiento*.

## 4 Tecnologías y refrigerantes de contenedores refrigerados

Las herramientas de ingeniería para determinar la seguridad del sistema han sido una práctica establecida durante décadas. En refrigeración para el transporte, estas metodologías de evaluación de riesgos se adoptaron formalmente después de la integración de R1234yf y R744 dentro de la industria automotriz (ISO 13043; ISO 17893:2024).<sup>85</sup>

Las fugas son un mal funcionamiento frecuente en todos los sistemas RAC. Estos se observan típicamente en las uniones de los subcomponentes y los codos de las bobinas del intercambiador de calor. Cabe destacar que el 90% de todas las fugas son de tamaño micro, y la mayoría de ellas son causadas por el desgaste mecánico y la vibración de las tuberías. Esta categoría de fugas presenta un riesgo de explosión insignificante, ya que no genera una atmósfera inflamable. Sin embargo, genera una atenuación de la capacidad de refrigeración y un aumento del consumo de energía durante un largo período de tiempo. Las fugas restantes son predominantemente de naturaleza catastrófica, derivadas de fuerzas externas. Estas fugas representan un riesgo significativo de ignición debido a la creación de una atmósfera inflamable, y si hay una fuente de ignición presente, existe un riesgo elevado de explosión.<sup>86</sup>

La inflamabilidad de los refrigerantes ha sido objeto de una amplia investigación durante un período prolongado, lo que ha llevado al desarrollo de medidas de mitigación efectivas. Estas medidas han sido diseñadas para reducir la formación de atmósferas inflamables y minimizar la probabilidad de ignición. Es crítico que se implementen medidas de reducción de riesgos en los

sistemas que contienen R290 y cualquier otro refrigerante inflamable, como el R1234yf. La combustión de R1234yf da como resultado la producción de fluoruro de hidrógeno tóxico.<sup>87</sup> Como declaró el Congreso de Automóviles Verdes en 2014: “El fluoruro más simple, el fluoruro de hidrógeno (o ácido fluorhídrico, HF) también es altamente corrosivo y tan tóxico que las quemaduras tan grandes como la palma de la mano pueden ser letales. El agente se une vorazmente al calcio en los fluidos corporales, y esto puede provocar insuficiencia cardíaca a menos que se administre rápidamente un antídoto. [...] Si se inhala, puede dañar los alvéolos de los pulmones, lo que le permite llegar a la circulación y cerrar las funciones vitales.”<sup>88</sup>

Se ha descubierto que el R290 tiene mayores límites de inflamabilidad en comparación con otros refrigerantes seleccionados.<sup>89</sup> Se ha demostrado que la presencia de flujo de aire dentro del espacio donde se ha filtrado el refrigerante puede resultar en una reducción sustancial en el riesgo de ignición. En circunstancias en las que el flujo de aire es lo suficientemente alto, el volumen inflamable puede encenderse de manera localizada, pero la llama no podría propagarse.<sup>90</sup> Por lo tanto, las opciones simples de diseño de infraestructura pueden reducir efectivamente el riesgo de atmósfera inflamable e ignición.

La inflamabilidad de los refrigerantes y las medidas adicionales que se consideran necesarias para garantizar una mitigación adecuada del riesgo representan un desafío importante en la adopción de R290 y otros refrigerantes. Este desafío se ve agravado por la percepción

85 ISO 13043:2011. (2011). ISO. Extraído el 3 Mayo, 2024, de ISO 13043:2011 - Vehículos de carretera — Sistemas de refrigerante utilizados en sistemas móviles de aire acondicionado (MAC) — Requisitos de seguridad.

86 Li, Y., et al. (2023). Características de fuga, difusión y distribución del refrigerante en un espacio limitado: una revisión exhaustiva.

87 Feller Michael, Lux Karin, Hohenstein Christian, Kornath Andreas (2014). Estructura y propiedades del 2,3,3,3-tetrafluoropropeno (HFO-1234yf). Zeitschrift für Naturforschung B, 2014; 69b: 379 DOI: 10.5560/ZNB.2014-4017

88 Noticias del Congreso de Automóvil Verde 11.04.2014: *Un estudio de LMU encuentra que el 20% de los gases de la combustión del refrigerante R1234yf MAC consisten en fluoruro de carbonilo altamente tóxico (corrección y actualización)*

89 Li, Y., et al. (2023). Investigación sobre las características de la intensidad de campo y el área inflamable de las fugas de refrigerantes en un espacio confinado.

90 Li, Y., et al. (2023). Características de fuga, difusión y distribución del refrigerante en un espacio limitado: una revisión exhaustiva.

## 4 Tecnologías y refrigerantes de contenedores refrigerados

del riesgo, que con frecuencia supera el riesgo real. De hecho, el número de accidentes derivados del uso de hidrocarburos en un número creciente de sistemas no ha aumentado. El éxito del isobutano (R600a, un refrigerante inflamable de tipo A3) en refrigeradores domésticos y R290 en secadoras domésticas y unidades de aire acondicionado portátiles demuestra que el uso de refrigerantes inflamables es alcanzable cuando hay una convergencia de voluntad política y técnica.<sup>92</sup>

La implementación del uso de refrigerantes inflamables se complica aún más por las barreras técnicas y económicas, incluido el costo de los refrigerantes y el alto costo asociado con la reducción de refrigerantes nocivos, como los HFC. Además, los requisitos de seguridad para los refrigerantes inflamables tienen el potencial de aumentar los costos, a pesar del costo relativamente bajo de los refrigerantes en sí. Otras barreras de carácter comercial y de consumo son la limitada competencia técnica de los proveedores locales, la ausencia de equipos locales de servicio y mantenimiento, la capacidad restringida de utilizar refrigerantes inflamables, la falta de disponibilidad de técnicos cualificados para hacer frente a los problemas y la falta de concienciación sobre los beneficios ambientales de los refrigerantes naturales.<sup>93</sup>

Por último, el compromiso político de promover el uso de hidrocarburos como agente refrigerante en todos los subsectores es fundamental para fomentar la aceptación e implementación de esta tecnología. Un estudio exhaustivo sobre las pruebas prácticas realizadas reveló que “los resultados de las pruebas de fugas R290

realizadas dentro y fuera de un contenedor refrigerado demostraron que el riesgo se sobreestima con frecuencia”.<sup>94</sup>

### 4.2.1 Normas de Seguridad para refrigerantes inflamables ISO 20854:2019

La norma ISO 20854:2019 se aplica a los contenedores térmicos equipados con sistemas de refrigeración que utilizan refrigerantes inflamables. Establece requisitos de seguridad para el diseño, operación y mantenimiento de estos sistemas para garantizar su uso seguro en varios modos de transporte, incluidos barcos, ferrocarriles, carreteras y logística intermodal.

La norma proporciona metodologías de evaluación de riesgos como HAZOP (análisis de peligros y operatividad por sus siglas en inglés), FMEA (análisis de modos y efectos de fallas por sus siglas en inglés) y FTA (análisis de árbol de fallas por sus siglas en inglés) para evaluar peligros potenciales, asegurando el cumplimiento de las regulaciones ambientales y de seguridad. También define procedimientos de prueba, sistemas de alarma, requisitos de ventilación y pautas de servicio para mitigar los riesgos asociados con los refrigerantes inflamables.

Al describir las prácticas de seguridad operativa, la ISO 20854:2019 ayuda a los fabricantes, compañías navieras y operadores de contenedores a hacer la transición a refrigerantes con menor impacto ambiental, alineándose con los esfuerzos globales para eliminar gradualmente los refrigerantes de alto GWP.

91 M.G. Beasley, P.G. Holborn, J.M. Ingram, G.G. Maidment (2018): Causa, consecuencias y prevención de incendios de refrigeración en viviendas residenciales. Revista de seguridad contra incendios, vol 102, páginas 66-76.

92 Conrad, Jobst (1995): Greenfreeze: éxito medioambiental por accidente y acción estratégica. En: Martin Jänicke, Helmut Weidner (Ed.): Política medioambiental exitosa: evaluación crítica de 24 casos

93 Vuppaladadiyam, A. K., et al. (2022). Progreso en el desarrollo y uso de refrigerantes y consecuencias ambientales no deseadas.

94 Ibid.

## 4 Tecnologías y refrigerantes de contenedores refrigerados

En aplicaciones prácticas, esta norma es esencial para las empresas involucradas en el transporte refrigerado, incluidas las líneas navieras, los proveedores de logística y los fabricantes de contenedores refrigerados. El cumplimiento de la norma ISO 20854:2019 garantiza que los refrigerantes inflamables se gestionen de forma segura, reduciendo el riesgo de incendio, explosión y exposición tóxica durante el funcionamiento y el mantenimiento. Al implementar funciones de seguridad como sistemas de detección de fugas, mecanismos de ventilación y protocolos de servicio adecuados, las empresas pueden mejorar la confiabilidad operativa, cumplir con los requisitos reglamentarios y mejorar la sostenibilidad de su logística de cadena de frío.

Algunos países están implementando esta norma para cumplir con los requisitos de la industria. En Costa Rica, INTECO, en colaboración con el MINAE y la GIZ, ha traducido, revisado y adoptado la norma ISO 20854:2019. Si bien actualmente la norma es voluntaria, se anticipa que será obligatorio en un futuro cercano. Es probable que otros países adopten medidas similares. Además, la nueva norma ha sido reconocida por la OMI.<sup>95</sup>

La ISO 20854:2019 se publicó en octubre de 2019 con el objetivo de minimizar los riesgos asociados al uso de refrigerantes inflamables en dichos sistemas. Es particularmente relevante para los sistemas de refrigeración integrados o montados en contenedores térmicos ISO, como se describe en ISO 1496-2. La aplicación de la norma se limita al transporte de carga refrigerada, abarcando contenedores refrigerados operativos,

contenedores refrigerados no operativos y tránsito intermodal descargado. Sin embargo, las operaciones continuas estáticas en tierra están excluidas del alcance de la norma.<sup>96</sup>

El desarrollo de la norma ISO 20854:2019 fue impulsado por el impacto previsto de las regulaciones globales y nacionales sobre los HFC utilizados en contenedores térmicos. Estas regulaciones, influenciadas por la Enmienda de Kigali al Protocolo de Montreal, tienen como objetivo abordar el alto GWP de los HFC y reducir gradualmente su uso y disponibilidad, particularmente para R134a, R404A y R23 en la refrigeración del transporte intermodal.

El propósito de la norma ISO 20854:2019 es facilitar el uso seguro de refrigerantes inflamables previamente no aceptados en contenedores térmicos refrigerados. Proporciona a los propietarios y operadores de contenedores el conocimiento y las herramientas para comprender y mitigar los riesgos asociados con el funcionamiento de equipos de refrigeración que utilizan refrigerantes inflamables. El objetivo general es garantizar que los niveles de seguridad de los sistemas de refrigeración de contenedores que utilizan refrigerantes inflamables sean proporcionales a los que emplean refrigerantes no inflamables.<sup>97</sup>

La implementación de la norma ISO 20854:2019 puede ser sencilla para las líneas navieras, los proveedores de logística y los fabricantes de contenedores refrigerados si se sigue un enfoque estructurado:

95 Organización Internacional de Normalización. (2019). Contenedores térmicos — Norma de seguridad para sistemas de refrigeración que utilizan refrigerantes inflamables — Requisitos de diseño y operación (Norma ISO No. 20854:2019)

96 Organización Internacional de Normalización. (2018). Contenedores de carga de la serie 1 — Especificación y pruebas (Norma ISO No. 1496-2:2018)

97 Organización Internacional de Normalización. (2019). Contenedores térmicos — Norma de seguridad para sistemas de refrigeración que utilizan refrigerantes inflamables — Requisitos de diseño y operación (Norma ISO No. 20854:2019)

## 4 Tecnologías y refrigerantes de contenedores refrigerados

### 1. Evaluar los riesgos y planificar la seguridad

- Realizar una evaluación de riesgos utilizando métodos estándar de la industria como HAZOP, FMEA o FTA para identificar peligros potenciales con refrigerantes inflamables.
- Implementar el uso de sistemas de ventilación, detección de fugas y prevención de incendios para minimizar los riesgos.
- Garantizar el cumplimiento de los requisitos ambientales y de seguridad ISO 5149 para sistemas de refrigeración.

### 2. Garantizar el cumplimiento de los equipos y el diseño

- Verificar que todas las unidades de refrigeración mecánica (MRU) y los contenedores térmicos cumplan con las normas de diseño y construcción ISO 20854:2019.
- Utilizar materiales y mecanismos de seguridad aprobados, incluida la detección automática de fugas, dispositivos de cierre de emergencia y contención adecuada del refrigerante.
- Realizar las pruebas requeridas de durabilidad, resistencia a las vibraciones y seguridad de la carga de refrigerante para garantizar la confiabilidad del sistema.

### 3. Capacitar el personal y establecer protocolos de mantenimiento.

- Educar a los técnicos y operadores sobre el manejo seguro de refrigerantes inflamables, el mantenimiento de rutina y los procedimientos de emergencia.
- Implementar programas de mantenimiento preventivo para reducir el riesgo de fallas del sistema.

- Instalar sistemas de alarma y herramientas de monitoreo para detectar fugas de manera temprana y alertar a los operadores sobre peligros potenciales.

### 4. Obtener la certificación y mantener el cumplimiento.

- Trabajar con organismos de certificación para garantizar el cumplimiento oficial de la norma ISO 20854:2019.
- Etiquetar y documentar adecuadamente los sistemas de refrigeración para cumplir con las regulaciones internacionales.
- Establecer procedimientos claros para el mantenimiento, la eliminación y el reemplazo de las unidades de refrigeración al final de su ciclo de vida.

Al integrar estos pasos en sus operaciones, las empresas y los operadores pueden garantizar la seguridad, la eficiencia y el cumplimiento normativo.

Esta norma pretende complementar la ISO 1496-2:2018, pero no aspira a sustituir a las normas existentes, como la serie ISO 5149. Emplea un enfoque basado en el riesgo para los requisitos de diseño, con el objetivo de reducir los riesgos para las personas, los activos y el ambiente, aunque no eliminarlos por completo. El desarrollo de ISO 20854:2019 involucró a una amplia gama de partes interesadas, incluidos fabricantes de sistemas de refrigeración, fabricantes de cajas de contenedores refrigerados, líneas navieras, sociedades de clasificación, propietarios de equipos y otros expertos de la industria.<sup>98</sup>

<sup>98</sup> Organización Internacional de Normalización. (2018). Series 1 contenedores de carga - especificaciones y testeo (Estándar ISO N°. 1496-2:2018)

## 4 Tecnologías y refrigerantes de contenedores refrigerados

### 4.3 Refrigerantes alternativos para contenedores refrigerados a futuro

Como se demuestra en la Tabla 4, el sector de contenedores refrigerados se caracteriza principalmente por el uso de refrigerantes HFC, que están sujetos a disposiciones de reducción gradual descritas en varios acuerdos internacionales. La actividad de investigación y desarrollo (I&D) continúa evaluando soluciones no inflamables (A1) de bajo GWP que podrían reemplazar a los dominantes R134a y R404A. Se prevé que el R134a sea reemplazado por la mezcla de HFC/HFO R513A, que ya ha comenzado a ingresar al mercado.<sup>99</sup> La mezcla en consideración consta de 56% de R1234yf y 44% de R134a, lo que le da a este refrigerante excelentes propiedades de inserción.<sup>100</sup> Sin embargo, el R513A sigue mostrando un alto valor de GWP, específicamente de 673. En consecuencia, la transición puede resultar en la adopción de R1234yf (A2L) por parte de los contenedores refrigerados. Además, este refrigerante posee propiedades de inserción favorables en comparación con los sistemas R513A y R134a.

El R404A se está sustituyendo actualmente por el R452A, a pesar de que todavía tiene un alto valor de GWP (2292), que es incluso más alto que el valor de GWP del refrigerante R134a utilizado actualmente.<sup>101</sup> En consecuencia, existe un creciente interés en explorar posibles alternativas al R404A, como el R454A y el R454C (A2L), que ofrecen valores de GWP significativamente más bajos. Sin embargo, cabe señalar que estas alternativas aún se encuentran en etapa de desarrollo. Se consideran refrigerantes de transición y se prevé que

no estarán ampliamente disponibles a largo plazo. Es notable que tanto el R454A como el R454C (A2L) exhiben altos valores de GWP, y el R454A en particular tiene un GWP más alto que el R454C. Debido a estos altos valores de GWP estos gases serían gradualmente eliminados de acuerdo con el cronograma de la Enmienda de Kigali.

Sin embargo, debe tenerse en cuenta que las opciones mencionadas pueden no considerarse sostenibles o respetuosas con el ambiente. Todos tienen un alto GWP y/o se transforman en TFA como parte de sus procesos de descomposición. En consecuencia, los refrigerantes naturales emergen como la única solución viable para procesos de refrigeración ambientalmente sostenibles, particularmente en el contexto del enfriamiento verde. Para la aplicación de contenedores refrigerados, se podría considerar R290 (propano), R744 (CO<sub>2</sub>) y amoníaco (R717).

El CO<sub>2</sub> ya está presente en el mercado, a pesar del aparente desafío de la necesidad de un sistema transcrito para que este refrigerante funcione en las condiciones en las que operan los reefers (alta temperatura ambiente). Por el contrario, actualmente no existe ningún producto disponible comercialmente con propano<sup>102</sup> o amoníaco. Como parte del proyecto Contenedores Refrigerados Ecológicos (Greener Reefers)<sup>103</sup>, se desarrollará y probará un prototipo de un contenedor refrigerado con propano en dos líneas navieras, con el objetivo de demostrar su potencial para disminuir las emisiones indirectas y directas de CO<sub>2</sub> equivalente.

99 Industria de contenedores de Maersk. (2022, 15 de septiembre). Refrigerantes - Industria de Contenedores Maersk. Industria de contenedores de Maersk -. Consultado el 3 de mayo de 2024 de Refrigerantes - Industria de Contenedores Maersk (mccontainers.com) <https://www.mccontainers.com/products/refrigerants/>

100 Las soluciones directas para refrigerantes son aquellas que requieren pocas o ninguna modificación a un sistema existente al reemplazar un refrigerante. El propano rara vez se clasifica como una solución directa porque su uso a menudo requiere cambios, como un compresor y un aceite de compresor diferentes.

101 Thermo King de Trane Technologies reducirá el potencial de calentamiento global de la refrigeración del transporte en casi un cincuenta por ciento. (s.f.). Consultado el 3 de mayo de 2024 de *Thermo King de Trane Technologies para reducir el potencial de calentamiento global de la refrigeración del transporte en casi un cincuenta por ciento* | Tecnologías de Trane

102 MCI desarrolló una vez un prototipo que resultó en el desarrollo de la norma ISO 20854.

103 Internationale Klimaschutz (IKI). (s.f.) Greener Reefers en el transporte marítimo internacional. Consultado el 3 de mayo de 2024 de *Greener Reefers en el transporte marítimo internacional* | Internationale Klimaschutzinitiative (IKI) ([international-climate-initiative.com](http://international-climate-initiative.com))

## 4 Tecnologías y refrigerantes de contenedores refrigerados

Además de los refrigerantes antes mencionados, el R23 está presente en los frigoríficos, aunque en cantidades insignificantes. Estas sustancias se utilizan para aplicaciones de temperatura ultra baja, con temperaturas de funcionamiento que oscilan entre  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . En esta solicitud, la única alternativa que está considerando la industria hasta la fecha es R473A (solo a  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), una mezcla de HFC/HFO/ $\text{CO}_2$ , con un GWP de 1835. Esto representa un impacto considerable, pero es significativamente bajo cuando se compara contra el valor GWP de 14.600 del R23. Esta aplicación plantea importantes desafíos para reducir el GWP de los refrigerantes, lo que subraya la necesidad de seguir investigando soluciones alternativas. La introducción del R290 como refrigerante para contenedores térmicos permitiría el uso de otros hidrocarburos para aplicaciones que requieren temperaturas ultrabajas.

### 4.3.1 Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2/\text{R744}$ )

Actualmente existe una unidad refrigerada marítima que opera con R744 y está disponible comercialmente bajo la marca Carrier NaturaLINE®. Sin embargo, la adopción de este tipo de tecnología ha sido limitada, con solo unos pocos miles de unidades actualmente en servicio. La introducción de esta solución es lenta debido a los desafíos relacionados con la capacidad de servicio, incluida la necesidad de capacitación especializada, la disponibilidad de técnicos calificados, el inventario global y la accesibilidad de las piezas de repuesto. La naturaleza transcítica del sistema requiere capacitación y preparación adicionales para la mayoría de los técnicos, ya que es un sistema específico que no se incluye comúnmente en los planes de estudio nacionales para los técnicos de RAC.

Según Carrier, el NaturaLINE® es tan eficiente energéticamente como las unidades Carrier PrimeLINE® de gama alta. En consecuencia, las unidades refrigeradas R744 de Carrier son prácticamente neutras desde el punto de vista climático en lo que respecta al refrigerante y, por lo tanto, ofrecen una solución tecnológica sostenible. Además, Carrier afirma que ambas unidades exhiben una tasa de reciclabilidad del 95%, lo que subraya su compromiso con la sostenibilidad.

Figura 7. NaturaLINE® de Carrier, una unidad de refrigeración para contenedores refrigerados que opera con R744<sup>104</sup>



<sup>104</sup> Unidad de refrigeración de contenedores NaturaLINE® | Carrier Transicold. (s.f.). Carrier. Consultado el 3 de mayo de 2024, de NaturaLINE® Unidad de refrigeración de contenedores | Carrier Transicold

## 4 Tecnologías y refrigerantes de contenedores refrigerados

El R744 ha sido probado en campo en contenedores refrigerados desde 2011. Sus características no inflamables hacen que el R744 sea una opción atractiva; sin embargo, su temperatura crítica relativamente baja (30,98 °C) dificulta su aplicabilidad y eficiencia en condiciones con altas temperaturas ambiente. De hecho, ha habido casos de pérdida de eficiencia a 15 °C de temperatura ambiente.<sup>105</sup> Se ha demostrado que el R744 exhibe excelentes propiedades termodinámicas, con un rendimiento comparable o superior en aplicaciones de baja temperatura, como la congelación. Sin embargo, se ha observado que exhibe un mayor consumo de energía en aplicaciones de temperatura media (enfriamiento y refrigeración) en comparación con el R404A, un refrigerante que ha sido identificado como uno de los más efectivos en una variedad de aplicaciones.<sup>106, 107</sup>

### 4.3.2 Propano (R290)

Desde el punto de vista de la sostenibilidad ambiental y económica, el propano (R290) y otros hidrocarburos (HC) son reconocidos como la opción óptima de refrigerante. Estos refrigerantes son compuestos naturales que poseen excelentes propiedades termodinámicas y son miscibles con aceites sintéticos.<sup>108</sup>

El R290 ya se utiliza ampliamente como refrigerante en diversas aplicaciones de refrigeración debido a su alta eficiencia energética<sup>109</sup> y bajo GWP. Se encuentra comúnmente en refrigeradores y congeladores domésticos, y muchos fabricantes líderes de electrodomésticos han adoptado el R290 para cumplir con estrictas regulaciones ambientales.<sup>110</sup> En el sector comercial, el R290 se usa ampliamente en vitrinas de supermercados, enfriadores de bebidas, congeladores de helados

y máquinas expendedoras refrigeradas, ofreciendo un rendimiento de enfriamiento superior y reduciendo significativamente las emisiones de carbono.

Además, los sistemas de aire acondicionado, particularmente en África, Europa y Asia, han comenzado a incorporar R290 debido a su eficiencia termodinámica y al cumplimiento de las regulaciones globales de eliminación gradual de HFC. En el sector del transporte, el R290 se está probando e implementando en sistemas de aire acondicionado de autobuses y trenes, así como en unidades de refrigeración de camiones, lo que contribuye a soluciones de transporte público y de carga más ecológicas.

Una comparación entre el R290 y el R404A, dos de los refrigerantes más efectivos en todos los sistemas, revela que el R290 exhibe una eficiencia entre 15-25% mayor en aplicaciones de temperatura media (0 °C) y una eficiencia 10-30% mayor en aplicaciones de baja temperatura (-20 °C). Esto sugiere que el propano tiene el potencial de ser una solución óptima a largo plazo para los contenedores refrigerados y las aplicaciones de refrigeración en general. El desarrollo de soluciones de refrigeración que emplean propano u otros hidrocarburos requiere el establecimiento de marcos regulatorios dedicados, evaluaciones integrales de riesgos y procedimientos de mantenimiento meticulosos.<sup>111</sup>

Una preocupación principal al contemplar el uso de R290, o incluso el diseño de nuevos equipos que lo incorporen, se refiere a su inflamabilidad. De acuerdo con la norma ISO 817 y la norma 34 de ASHRAE, los refrigerantes a base de hidrocarburos se clasifican como

105 Giroto, S., et al. (2004). Sistema de refrigeración comercial que utiliza CO<sub>2</sub> como refrigerante.

106 Ge, Y., & Tassou, S. (2011). Análisis termodinámico de sistemas de refrigeración con boosters de CO<sub>2</sub> transcrito en supermercados.

107 Gullo, P., et al. (2016). Evaluación del rendimiento energético y medioambiental de los sistemas de refrigeración de supermercados con booster R744 que funcionan en climas cálidos.

108 Vuppaladiyam, A. K., et al. (2022). Progreso en el desarrollo y uso de refrigerantes y consecuencias ambientales no deseadas.

109 Superradiatorcoils, 10.03.2022: R-290: Pros, Contras y Comparaciones con R22, R404A, & R134a | Bobinas de súper radiador

110 CK Supply Guía del refrigerante R290 | Suministro de CK

111 Minetto, S., et al. (2023). Una revisión de las oportunidades actuales y futuras con fluidos de trabajo naturales en refrigeración de transporte.

## 4 Tecnologías y refrigerantes de contenedores refrigerados

A3, lo que indica un alto grado de inflamabilidad. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que existen estándares para el diseño y uso seguro de equipos con estos refrigerantes, incluso para contenedores refrigerados.<sup>112</sup>

En relación con el uso de propano y contenedores refrigerados, MCI inició un proyecto de investigación en 2012 con el objetivo de desarrollar una nueva generación de refrigerantes para su uso en contenedores refrigerados. Se realizó un estudio termodinámico detallado sobre el rendimiento energético del perfil operativo de los contenedores refrigerados, y el refrigerante más prometedor se identificó como R290. En 2013, se llevó a cabo una evaluación de riesgos, que concluyó que los riesgos asociados con el ciclo de vida de los contenedores refrigerados, que abarcan operaciones en buques, ferrocarriles y camiones, e inspecciones, y actividades de servicio y mantenimiento, son comparativamente bajos y aceptablemente bajos para la industria intermodal.<sup>113</sup>

En consecuencia, se desarrollaron prototipos equipados con R290 y se sometieron a rigurosas pruebas. Los resultados de estas pruebas prácticas indicaron que los riesgos asociados con el funcionamiento de los sistemas de refrigeración que emplean R290 como refrigerante están, en general, sobrestimados. Se consideró factible evaluar situaciones de atmósferas potencialmente explosivas y establecer medidas apropiadas. Además, se determinó que los incidentes de fugas menores y medianos son manejables.<sup>114</sup>

Sin embargo, en 2018, MCI anunció que, dada la tensa situación del mercado, no había suficiente demanda y voluntad para probar y utilizar tecnologías basadas en R290. Como medida provisional, se sugirió el R513A como sustituto del diseño del sistema de refrigeración existente, con la intención posterior de pasar al R1234yf.<sup>115, 116</sup>

### 4.3.3 R1234yf

Es evidente que una serie de aplicaciones dentro del sector RACHP, MAC y refrigeración de transporte, están contemplando la adopción de R1234yf como una alternativa de bajo GWP al R410A y al R134a, dos de los refrigerantes más frecuentes en numerosos sistemas.<sup>117</sup> El R1234yf ya se ha implementado en MAC, algunas estimaciones que indican que el refrigerante está presente en más de 50 millones de automóviles. La investigación ha demostrado que el R1234yf es un reemplazo adecuado para el R134a en la mayoría de los sistemas; sin embargo, se requiere un proceso de optimización para garantizar condiciones de funcionamiento óptimas. En consecuencia, no puede considerarse una solución directa a los sistemas existentes, ya que existen problemas de compatibilidad con ciertos lubricantes.<sup>118</sup>

El R1234yf se considera un posible sustituto en los contenedores refrigerados, dado su bajo GWP y baja inflamabilidad. MCI ha estado desarrollando esta opción desde que la compañía se alejó del propano en 2018. La solución provisional, R513A, contiene un 56% de R1234yf, lo que facilita una transición perfecta en las características de los componentes empleados en el sistema de refrigeración.<sup>119</sup>

112 ISO 20854:2019. (2019). ISO. Consultado el 3 Mayo, 2024, de *ISO 20854:2019 - Contenedores térmicos — Norma de seguridad para sistemas de refrigeración que utilizan refrigerantes inflamables — Requisitos de diseño y funcionamiento*.

113 König, H., et al. (2016). Pruebas prácticas con R290 utilizadas en pruebas de fugas de refrigeración de contenedores refrigerados.

114 Ibid.

115 Maersk ahora está considerando el R1234yf como un futuro refrigerante para contenedores refrigerados. (2018, 17 de noviembre). Consultado el 06 Mayo, 2024, de *Maersk ahora está considerando el R1234yf como un futuro refrigerante para contenedores refrigerados (refindustry.com)*

116 WorldCargo News. (2018, Noviembre 12). MCI pone propano en hielo > WorldCargo News. WorldCargo News > Sitio líder para la industria de gestión de carga. Consultado el 06 de Mayo, 2024, de *MCI puts propane on ice > WorldCargo News*

117 Alternativas respetuosas con el clima a los HFC. (s.f.). Acción por el clima. Consultado el 06 Mayo de 2024 de *Alternativas respetuosas con el clima a los HFC - Comisión Europea (europa.eu)*

118 Pabón, J. J. G., et al. (2020). Aplicaciones del refrigerante R1234yf en sistemas de calefacción, aire acondicionado y refrigeración: una década de investigaciones.

119 Industria de Contenedores Maersk. (2023, Octubre 17). R1234YF y su relevancia para la industria de los contenedores refrigerados. Consultado el 06 Mayo, 2024, de *R1234YF y su relevancia para la industria de los contenedores refrigerados | LinkedIn*

## 4 Tecnologías y refrigerantes de contenedores refrigerados

La guía técnica de la Asociación de Propietarios de Contenedores sobre las cuestiones reglamentarias relativas a los gases fluorados refrigerantes evalúa el R1234yf como la solución técnica más prometedora.<sup>120</sup> En este documento, se hace referencia al R1234yf como una posible solución de transición, con un plazo proyectado de dos a tres años para la implementación completa en el mercado. Sin embargo, dada la atmósfera política actual con respecto a los gases fluorados y PFAS, así como de sus posibles implementaciones y nuevas restricciones, el documento ilustra que se necesitaría un período de transición de 20 años, lo que significa que se requerirían regulaciones más flexibles.

Una comparación de R1234yf y HFC con propano no revela superioridad de los primeros. Las propiedades termodinámicas y el rendimiento energético de estos refrigerantes son indistinguibles, incluidos los de otros hidrocarburos. Aunque las características de inserción

directa parecen favorecer a los HFO, no son una solución fácilmente disponible, como se mencionó anteriormente. Desde una perspectiva económica, considerando las cadenas de suministro y los costos de producción, ambos funcionan de manera similar, lo que resulta en costos de proceso similares.

Sin embargo, un cambio en el equilibrio se hace evidente cuando se consideran los atributos ambientales y la inflamabilidad.<sup>121,122</sup> En el discurso que rodea la adopción de R1234yf y otros HFO, existe una tendencia a minimizar la importancia de PFAS y TFA. Además, los frigoríficos R1234yf también deben cumplir con la norma ISO 20854:2019 debido a la clasificación de levemente inflamable (A2L). Por lo tanto, se necesitan medidas e inversiones similares para el R1234yf y para el R290 en lo que respecta a la adaptación necesaria del sistema, la capacitación de los empleados y la mitigación de atmósferas inflamables y riesgos de ignición.

Tabla 5. Resumen de refrigerantes utilizados en contenedores refrigerados

Refrigerante	Eficiencia energética y coeficiente de rendimiento (COP <sup>123</sup> )	Potencial de calentamiento global (IPCC AR 6) <sup>124</sup>	Costos de refrigerantes <sup>125</sup>	Fin de la vida útil	Productos secundarios PFAS <sup>126</sup>	Servicio y facilidad de servicio <sup>127</sup>	Conocimiento/ Aplicación <sup>128</sup>	Inflamabilidad <sup>129</sup>	Toxicidad de los productos secundarios <sup>130</sup>	Resumen
R134a	✓	✗ 1530	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✗
R1234yf	✓	✓ 0,5	✗	✗	✗✗	✓	✓	✗	✗	✗✗
R290	✓✓	✓ 0,02	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓✓
R744 (CO <sub>2</sub> )	✓	✓ 1	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓

120 Asociación de Propietarios de Contenedores, COA y Grupo de Trabajo del Foro de Contenedores Refrigerados. (2022). CONTENEDORES REFRIGERADOS: CUESTIONES REGLAMENTARIAS RELATIVAS A LOS GASES FLUORADOS REFRIGERANTES.

121 Wang, Y., et al. (2022). Previsión de tendencias tecnológicas y descubrimiento de oportunidades tecnológicas basadas en minería de textos: el caso de la tecnología de contenedores refrigerados.

122 Yadav, S., et al. (2022). Un estudio exhaustivo sobre los refrigerantes del siglo XXI - R290 y R1234yf: una revisión.

123 Futuras tecnologías de refrigeración con refrigerantes naturales. Comparación de eficiencia energética – seguridad – estándares y costos, 2013, Intermodal Europe Hamburg Messe by Holger König

124 Informe de evaluación 6 de la IPCC *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*

125 *Significativo aumento de precios para refrigerantes con alto GWP - Cooling Post*. Cooling Post 25.02.2025

126 Comisión Europea 19.10.2023, Noticia de la Dirección General de Medio Ambiente *Impactos en la salud y ambiente impulsa el llamado para regular los "químicos eternos"*.

127 Futuras tecnologías de refrigeración con refrigerantes naturales. Comparación de eficiencia energética – seguridad – estándares y costos, 2013, Intermodal Europe Hamburg Messe por Holger König

128 *Ibid.*

129 Hoja informativa 1 de ONU Medio Ambiente y ASHRAE "Actualización sobre nuevas designaciones de refrigerantes y clasificaciones de seguridad" Noviembre 2022 *UNEP/ASHRAE Fact Sheet de refrigerantes #1 - Actualización de la clasificación de seguridad y designación de nuevos refrigerantes*

130 Michael Feller, Karin Lux, Christian Hohenstein, Andreas Kornath. Estructura y Propiedades de 2,3,3,3-Tetrafluoropropene (HFO-1234yf). *Zeitschrift für Naturforschung B*, 2014; 69b: 379 DOI: 10.5560/ZNB.2014-4017

# 5 Potencial de mitigación

La adopción de refrigerantes como el R290 presenta una oportunidad significativa para la reducción de emisiones en el sector de la refrigeración y enfriamiento. Este capítulo explora su potencial de escalabilidad e impacto ambiental.

Con el fin de visualizar y comprender el potencial de reducción de las emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> mediante la implementación de contenedores refrigerados ecológicos, el proyecto ha calculado una disminución potencial teórica de las emisiones de CO<sub>2</sub>eq de toda la flota que podría lograrse mediante la introducción de un contenedor refrigerado con R290 y una mayor eficiencia energética en varios escenarios, dependiendo de diferentes circunstancias. Dada la vida útil proyectada de 15 años para los contenedores refrigerados, una transición a un refrigerante alternativo sería un proceso gradual.

Se ha descubierto que la flota actual genera emisiones anuales de 18,76 Mt CO<sub>2</sub>eq, con el 96% de estas emisiones atribuidas a R134a y proporciones más pequeñas a R404A, R452A, R513A y R744 (CO<sub>2</sub>). Este hallazgo se basa en la base de datos ATO de WUR, que proporcionó datos cruciales sobre el tamaño de la flota de contenedores refrigerados, la participación de refrigerantes y la tasa de crecimiento.

El uso de R290 en el ámbito del aire acondicionado móvil (MAC) ha demostrado ser un esfuerzo exitoso, particularmente en el contexto de camiones, remol-

ques y transporte público. Los sistemas HVAC móviles para servicios de autobuses y trenes que utilizan R290 y R744 ya están en el mercado. Actualmente, los vehículos de pasajeros con motor de combustión utilizan principalmente R1234yf en la UE. Los automóviles totalmente eléctricos deben usar refrigerantes naturales en sus sistemas HVAC y sistema de gestión térmica de la batería. Sin embargo, se ha anticipado una doble trayectoria en la adopción del R290, caracterizada por una transición gradual de la flota contenedores refrigerados hacia el uso de este refrigerante.

El factor principal que influye en la reducción de emisiones es la adhesión de la industria naviera y los fabricantes a los objetivos de reducción de la intensidad de las emisiones de la OMI, así como su inversión en tecnología más eficiente desde el punto de vista energético. Además, las tasas de crecimiento de la flota refrigerada tienen un impacto directo en las posibles emisiones futuras. El aumento en el número de contenedores refrigerados se asocia con emisiones elevadas a lo largo del tiempo, atribuibles a fugas e incentivos inadecuados para el mantenimiento. Con el fin de determinar los medios más eficaces para reducir las emisiones, se realizó un análisis exhaustivo que abarcó cuatro de las treinta combinaciones posibles de introducción de tecnología y cumplimiento de la normativa existente para el desarrollo de las emisiones hasta 2050 (véase el anexo para la exploración de escenarios).

## 5 Potencial de mitigación

La discrepancia entre el mejor escenario posible y el escenario en el que se alcancen los niveles más altos de emisiones acumuladas para 2050 es de 171,8 Mt CO<sub>2</sub>eq. Esto equivale a las emisiones de 40 centrales eléctricas de carbón en un año. Es importante señalar que esta reducción de emisiones depende de dos factores clave: en primer lugar, la industria debe aumentar la eficiencia energética de la tecnología de refrigeración; y, en segundo lugar, el R290 debe introducirse rápidamente en el mercado. En particular, este análisis no considera medidas adicionales que podrían mejorar significativamente el potencial de reducción de emisiones, como el desarrollo de tecnologías avanzadas de motores en furgonetas o la adopción del hidrógeno como fuente de combustible, entre otras.

### 5.1 Enfoque para el cálculo del potencial de mitigación.

El cálculo de las emisiones totales se realiza de acuerdo con los principios de la fórmula TEWI (Total Equivalent Warming Impact o Impacto Total Equivalente del Calentamiento). Esta fórmula abarca tanto las emisiones directas como las indirectas, lo que proporciona una evaluación exhaustiva del impacto ambiental de la producción de energía.<sup>131</sup>

En el contexto de los sistemas de refrigeración, las emisiones directas son atribuibles a dos fuentes principales: en primer lugar, la fuga de los refrigerantes empleados durante el funcionamiento y, en segundo lugar, su eliminación al final de su vida útil. Por el contrario, las emisiones indirectas exhiben una proporcionalidad directa con el consumo de energía, dada la intensidad de carbono asociada del combustible o la tecnología empleada en la generación de electricidad para la operación de contenedores refrigerados.

Para facilitar este cálculo, las emisiones indirectas se definen como las emisiones que se producen durante el tiempo de viaje y se estiman en función del CO<sub>2</sub> equivalente de la intensidad de carbono del combustible del buque. La estimación de las emisiones directas se deriva de la fuga de refrigerante durante las fases de operación y desmantelamiento de los contenedores térmicos. La aplicación de estas ecuaciones se realiza para cada año desde 2018 hasta 2050, abarcando todas las unidades operativas y las programadas para su desmantelamiento. También es pertinente señalar que ciertas variables han sido designadas con el subíndice, dado que sus valores están sujetos a alteraciones a lo largo de los años designados.

131 Carel Industries. (2020, July 7). Cómo usar TEWI para comparar el impacto ambiental de un sistema de refrigeración. Consultado el 15 de Mayo, 2024, de *Cómo usar TEWI para comparar el impacto ambiental de un sistema de refrigeración* (carel.com)

## 5 Potencial de mitigación

Para cuantificar estos beneficios, se aplica la fórmula TEWI, que abarca tanto las emisiones directas como las indirectas:

$$TEWI_n = \text{Emisiones Directas } (DE_n) + \text{Emisiones Indirectas } (IE_n)$$

$$DE_n = \text{Fuga}_n + \text{Fin de Vida}_n$$

$$\text{Fuga}_n = GWP_{avg,n} [kg_{ref}/kg_{CO_2eq}] \times \text{carga} [kg_{ref}] \times \text{tasa de fuga} [\%]$$

$$\text{Fin de Vida}_n = GWP_{avg,n-15} [kg_{ref}/kg_{CO_2eq}] \times \text{carga} [kg_{ref}] \times (1 - \text{Tasa de recuperación} - \text{tasa de fuga}) [\%]$$

$$IE = \text{demanda de potencia base}_n [kW] \times \text{horas de operación} [h] \times \text{intensidad de carbono}_n [kg_{CO_2eq}/kWh]$$

El razonamiento matemático empleado para el cálculo de las emisiones de TFA a partir de la descomposición de los refrigerantes emitidos fue coherente con la metodología descrita anteriormente. Las emisiones de TFA se estimaron con la información presentada en la Tabla 4. En los casos en que se trata de mezclas de refrigerantes, la emisión de TFA se calcula en función de la composición de la mezcla.

Tabla 6. Emisiones de TFA calculadas para refrigerantes relevantes en contenedores refrigerados <sup>132, 133, 134</sup>

Refrigerante	equivalencia TFA
R134a	0,2
R404A	0,06
R452A	0,3
R513A	0,648
R1234yf	1
R744	0
R290	0

Los siguientes parámetros fundamentales del cálculo se estimaron utilizando datos de la base de datos ATO, literatura académica y comentarios de la industria.

Para estimar la tasa de crecimiento, se observó la diferencia relativa interanual en contenedores construidos cada año, entre los años 2003 y 2023. Se encontró que la media de la diferencia relativa interanual era cercana al 8%, que se seleccionó como la tasa de crecimiento estimada hasta 2050.

La mayoría de la literatura existente y los comentarios de la industria coinciden en que la vida útil media de una unidad refrigerada es de 15 años.<sup>135</sup> Es importante tener en cuenta que esta cifra se utiliza para estimar el tamaño de la flota calculando la suma de todos los nuevos frigoríficos construidos anualmente. La cifra de la base de datos de la ATO se corrigió con la estimación de la OMI del tamaño de la flota refrigerada en 2018, que

132 Behringer, D., et al. (2021). Productos de degradación persistentes de refrigerantes halogenados y agentes espumantes en el medio ambiente: tipo, concentraciones ambientales y destino, con especial atención a los nuevos sustitutos halogenados con bajo potencial de calentamiento atmosférico (ISSN 1862-4804). Agencia Alemana para el Medio Ambiente.

133 Harrison, J. J., et al. (2021). Quince años de observaciones satelitales HFC-134a: comparaciones con cálculos SLIMCAT. Revista de Investigación Geofísica: Atmosferas 126 (8)

134 Yi, L., et al. (2023). Observación atmosférica y emisiones del HFC 134a en China y cuatro de sus ciudades. Environ. Sci. Technol. 57 (12).

135 Lundsgaard, C. A., et al. (2020). Estudio preparatorio sobre Contenedores Refrigerados: Informe de las Tareas 1 y 2. En Estudio preparatorio sobre contenedores refrigerados: Informe de las tareas 1 y 2.

## 5 Potencial de mitigación

fue de 2,49 millones de contenedores refrigerados.<sup>136</sup> Esta corrección se utilizó para estimar la composición de la flota de los últimos 15 años, unidades que posteriormente se considerarían dadas de baja en el cálculo a partir de 2018.

Los supuestos sobre los parámetros básicos se derivaron de la investigación académica y los comentarios de expertos de la industria (ver Tabla 5). La tasa de fuga se estableció en 15%, lo que representa una estimación más conservadora en comparación con el 25% utilizado en otros estudios. La intensidad de carbono de la electricidad generada a bordo del buque se estima en 0,7 kgCO<sub>2</sub>/kWh, lo que refleja los motores típicos del transporte marítimo, aunque un análisis más amplio arrojó una cifra de 0,91 kgCO<sub>2</sub>/kWh. El Reglamento de la UE 2023/1805 plantea un desafío adicional para que las líneas navieras limiten la intensidad de GEI de la energía utilizada a bordo de los buques con una disminución de emisiones de hasta el 80% para 2025.<sup>137</sup> Se supone que las horas anuales de funcionamiento en el mar son 4.800, sin distinción entre condiciones cargadas y descargadas.<sup>138</sup>

La carga de refrigerante es de 5 kg por unidad, con una tasa de recuperación del 60% en el momento del desmantelamiento. La demanda de energía base se

establece en 2,5 kW y la vida útil proyectada del sistema es de 15 años. Se estima que las ganancias potenciales de eficiencia oscilan entre el 7,5% y el 20%.<sup>139, 140, 141</sup>

Para calcular el factor de emisión de los combustibles utilizados por los buques, se tomó un promedio de los combustibles utilizados actualmente (Tabla 7):

Tabla 7. Mezcla de combustibles utilizada para el escenario de mitigación basado en el Marco GLEC V3.1

Combustible	Participación
Combustible Pesado Bunker	50,42
Combustible ligero	30,25
Gasóleo Marino/Diésel Marino	12,49
Gas natural Licuado	6,72
Etano	0,05
Bio combustibles	0,04
Gas Licuado de petróleo	0,02
Metanol	0,00
Etanol	0,00

136 OMI. (2020). Cuarto estudio de GEI de la OMI 2020. En *Cuarto Estudio de Gases de Efecto Invernadero 2020 (imo.org)*.

137 Reglamento (UE) 2023/1805 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 13 de septiembre de 2023, relativo a la utilización de combustibles renovables e hipocarbónicos en el transporte marítimo y por el que se modifica la Directiva 2009/16/CE (*Reglamento - 2023/1805 - EN - EUR-Lex*)

138 A medida que la industria ha madurado y ha entrado en la era digital, hoy es posible medir distintos parámetros que se consideran en los escenarios calculados. A medida que la industria se vuelva más transparente y los datos estén disponibles, también se podrá reconsiderar el impacto de las emisiones. Si se calcularan los escenarios sobre la base de un tiempo específico de operación de una hora, el potencial de mitigación tendría el mismo impacto en términos de magnitud perceptual. El impacto de cada uno de los contenedores podría calcularse a partir de datos reales de operación. Las emisiones indirectas asumidas para una operación de 4800 horas requieren diferenciar entre estado encendido y estado apagado, lo cual no estaba claramente especificado en el artículo de investigación citado.

Podemos corregir esta situación introduciendo un parámetro de entrada de variación, que oscile entre 2000 y 5000 horas de operación anual, y que defina los límites inferior y superior para el cálculo de las emisiones.

139 Comentarios de la industria naviera confirmados en el taller del proyecto 2024.

140 Ozone Secretariat. (2018). El potencial para mejorar la eficiencia energética de la refrigeración, el aire acondicionado y las bombas de calor. *briefing-note-b\_potential-to-improve-the-energy-efficiency-of-refrigeration-air-conditioning-and-heat-pumps.pdf (unep.org)*

141 Las diferencias de eficiencia derivadas de las propiedades termodinámicas de los dos refrigerantes (R290 y R134a) son insignificantes. Sin embargo, esto implica a su vez que, en la práctica, los principales factores que influyen en la eficiencia energética vienen determinados por la tecnología del compresor, las estrategias de control, el tipo de ventiladores, etc. Además, entre los compresores existe un alto grado de variabilidad en la eficiencia, lo que se traduce en diferencias en el consumo de energía que van desde -14% hasta 25% con R134a y desde -10% hasta 17% con R290.

## 5 Potencial de mitigación

El cálculo de emisiones consideró varias regulaciones y su posible implementación, que incluyen:

- Cumplimiento de la estrategia de descarbonización de la OMI.
- Cumplimiento del Reglamento de la UE sobre gases fluorados para contenedores refrigerados.
- Cumplimiento de la Enmienda de Kigali.

Para cada uno de los escenarios, si la industria siguiera las regulaciones políticas, diferenciamos entre la posibilidad de que no haya un contenedor refrigerado R290, una adopción lenta y rápida de la tecnología en el mercado. Además, se calcularon las ganancias de eficiencia energética para cada posibilidad para toda la flota.

Los escenarios con las emisiones más altas y más bajas son los siguientes:

### **Escenario con las emisiones más bajas:**

Bajo este escenario la industria naviera cumple con la OMI y el Reglamento de gases fluorados de la UE, logra ganancias de alta eficiencia energética para toda la flota con refrigerantes mixtos y prevé una rápida adopción de contenedores refrigerados R290 en 2050 con una participación de mercado del 50%. Este escenario indica 638,92 Mt CO<sub>2</sub>eq acumulados para 2050.

### **Escenario con las emisiones más altas:**

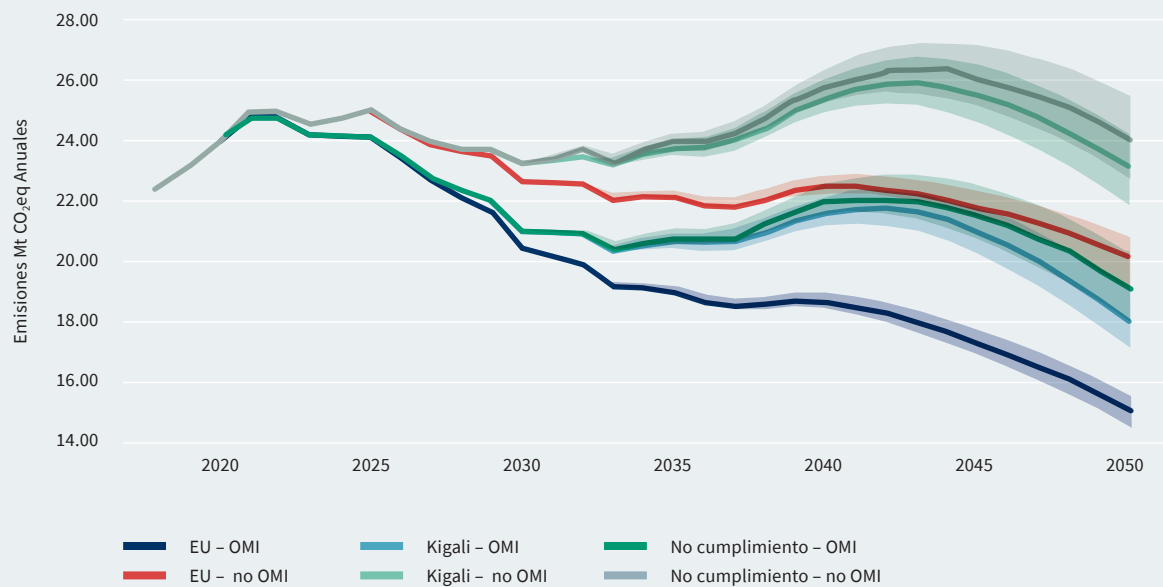
Este escenario se caracteriza por el incumplimiento de cualquier regulación política, la no introducción de la tecnología refrigerada R290 y la falta de concesiones para las ganancias de eficiencia energética. Se proyecta que las emisiones acumuladas en este escenario alcancen los 810,74 Mt CO<sub>2</sub>eq para 2050.

El presente estudio plantea un término medio, a saber, la implementación de la estrategia de la OMI, aunque con retrocesos en los demás parámetros. El escenario de emisiones más altas se alinea con la estrategia de la OMI, pero no incorpora la implementación de políticas adicionales, como la Enmienda de Kigali o el Reglamento de gases fluorados de la UE. Este escenario también supone que no se introducirá en el mercado el uso de R290 ni que la eficiencia energética de la flota refrigerada, con emisiones acumuladas de 747,64 Mt CO<sub>2</sub>eq para 2050.

Un posible escenario alternativo es la no alineación con la estrategia de la OMI. Sin embargo, este escenario demuestra reducciones significativas de emisiones debido a la combinación del cumplimiento de los gases fluorados de la UE, las mejoras de alta eficiencia energética y la rápida adopción del mercado del R290. Los factores descritos anteriormente dan como resultado emisiones acumuladas de 700,3 Mt CO<sub>2</sub>eq para 2050, lo que enfatiza el papel fundamental de las ganancias de eficiencia y las transiciones de refrigerantes.

## 5 Potencial de mitigación

Figura 8. Emisiones anuales de escenarios promedios y su variabilidad



En todos los escenarios, también se calculó un aumento en los contenedores refrigerados R744 y la introducción de R1234yf en el mercado. En consecuencia, también se calculó la cantidad futura de PFAS debido al uso de R1234yf como refrigerante para contenedores refrigerados.

### 5.2 ‘Productos químicos eternos’ y contenedores refrigerados

Los llamados “productos químicos eternos”, específicamente PFAS, son subproductos químicos de R134a o R1234yf que se liberan a la atmósfera. El R134a se utiliza en el 96% de los equipos de refrigeración del mercado actual, mientras que el R1234yf se utiliza en sistemas de aire acondicionado móviles.

## 5 Potencial de mitigación

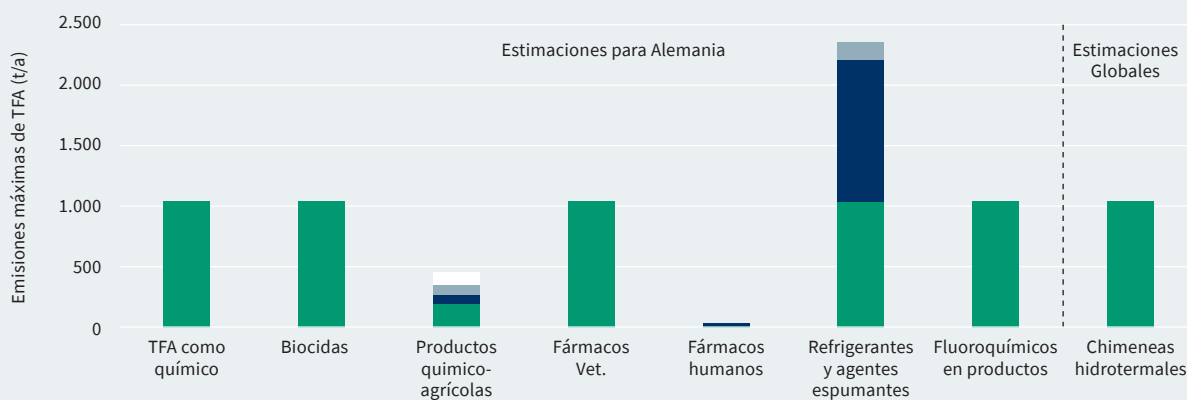
PFAS, un acrónimo para referirse a las sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas, son sustancias químicas sintéticas que se han utilizado en diversos productos industriales y de consumo desde la década de 1950. Estos productos químicos son conocidos por su resistencia a la degradación en el ambiente y su capacidad para acumularse en el cuerpo humano.<sup>142</sup> El TFA se forma como un producto de degradación de PFAS y, por lo tanto, forma parte de los HCFC y los HFC, y ahora se identifica en los HFO.

En Alemania, las principales fuentes de TFA se identifican actualmente como refrigerantes y propulsores empleados en sistemas móviles de aire acondicionado (ver Figura 9, zona azul oscuro). Esta observación subraya

la compatibilidad del R1234yf, un refrigerante que también se puede utilizar en unidades de refrigeración, con un alto contenido de TFA. Sin embargo, cabe destacar que esta sustancia sufre una descomposición completa cuando se expone al aire, el agua o el suelo.

Si bien las fuentes naturales como los respiraderos hidrotermales contribuyen a las emisiones globales de TFA, actualmente no se dispone de datos regionales para Alemania y Europa, lo que deja solo estimaciones globales. Las dos fuentes principales de TFA son R134a (segmento inferior) seguido de R1234yf (segmento restante). La cantidad más pequeña es TFA de diferentes fuentes.

Figura 9. Emisiones máximas estimadas de TFA en toneladas/año para el grupo relevante de productos químicos



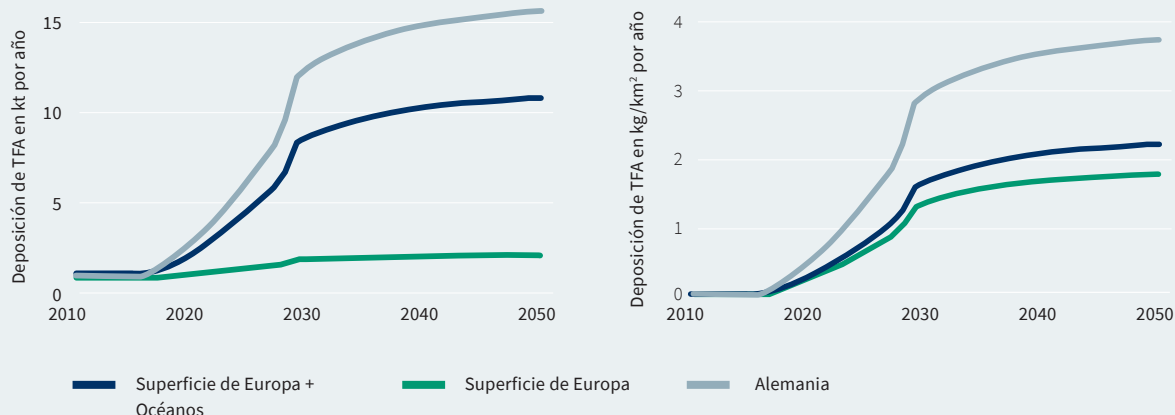
142 Mueller, R. y Schlosser, K. E. (2020). Historia y uso de sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas (PFAS) que se encuentran en el medio ambiente. Consultado el 25 de junio de 2024, de *Historia y uso de sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas (PFAS) encontradas en el medio ambiente* ([itrcweb.org](http://itrcweb.org))

## 5 Potencial de mitigación

En el campo de la refrigeración, cada vez se presta más atención a las alternativas sostenibles desde el punto de vista ambiental a los refrigerantes convencionales. Esto incluye la exploración de refrigerantes naturales para sistemas de aire acondicionado móviles.<sup>143</sup>

La Agencia Federal de Medio Ambiente de Alemania ha pronosticado un aumento de la presencia de TFA en la atmósfera en toda Europa para 2050. Esta proyección es atribuible al uso industrial de R1234yf en MAC (Figura 10).

Figura 10. Tasas futuras estimadas de deposición de TFA y de deposición de TFA para Europa debido a la degradación de HFO-1234yf exclusivamente<sup>144</sup>



La evidencia sugiere la existencia de otros refrigerantes que contribuyen a este aumento, mezclas de R1234yf o R404A con una participación de mercado del 4% y R452A con una participación de mercado aún más insignificante del 0,1%. Además del refrigerante R134a de

alto GWP, que tiene una participación de mercado del 96%, también es un componente de TFA en la medida del 20%. Esto subraya el imperativo de que la industria marina acelere la identificación de un refrigerante alternativo adecuado.

143 Behringer, D., et al. (2021). Productos de degradación persistentes de refrigerantes halogenados y agentes espumantes en el medio ambiente: tipo, concentraciones ambientales y destino con especial atención a nuevos sustitutos halogenados con bajo potencial de calentamiento atmosférico (ISSN 1862-4804). Agencia Alemana para el Medio Ambiente.

144 Ibid.

## 5 Potencial de mitigación

Tabla 8. Designación de escenarios para la proyección de emisiones de TFA

<b>S1</b>	Gases fluorados de la UE / Sin adopción	<b>S4</b>	Cronograma de Kigali / sin adopción	<b>S7</b>	Sin cumplimiento / Sin adopción
<b>S2</b>	Gases fluorados de la UE / R290 Adopción rápida	<b>S5</b>	Cronograma de Kigali / R290 Adopción rápida	<b>S8</b>	Sin cumplimiento / R290 Adopción rápida
<b>S3</b>	Gases fluorados de la UE / R290 Adopción lenta	<b>S6</b>	Cronograma de Kigali / R290 Adopción lenta	<b>S9</b>	Sin cumplimiento / R290 Adopción lenta

### 5.3 Resultados

Las proyecciones demuestran un aumento de las emisiones de TFA en todos los escenarios, ya que se supone que la penetración en el mercado del R1234yf se realiza en los distintos escenarios. El análisis indica que el Reglamento de gases fluorados de la UE ejerce una influencia sustancial en la selección de refrigerantes y tiene el potencial de dar lugar a una adopción más amplia del R1234yf en los equipos de refrigeración como solución a medio plazo. Sin embargo, el empleo de R1234yf también conducirá a un aumento sustancial de TFA, debido a su condición de refrigerante con un bajo GWP. Esto es particularmente pertinente si un contenedor refrigerado R290 no está disponible para su adopción en el mercado. La introducción más rápida de los contenedores refrigerados R290 tendría el impacto más significativo en la reducción de TFA sin cambiar o permitir R1234yf.

Se prevé que la eliminación gradual del R134a tenga un efecto beneficioso en los esfuerzos de protección del clima de la industria naviera y los distintos países,

como se ha observado con otros refrigerantes de alto GWP como el R513A. Sin embargo, con el Reglamento de gases fluorados de la UE ahora en vigor, es probable que los clientes prefieran los contenedores refrigerados R744 como alternativa natural sin GWP ni TFA. Sin embargo, debido a su mayor consumo de energía, no se espera que esta tecnología domine el mercado en un futuro próximo. En ausencia de una adecuada promoción y desarrollo de alternativas de refrigerantes naturales como el CO<sub>2</sub> o el R290, el sector puede verse obligado a participar en un dilema injustificado, caracterizado por la generación de TFA con el fin de reducir las emisiones de GEI, un tema de especial preocupación dentro de la agenda ambiental global. El sector de los contenedores refrigerados está preparado para enfrentar numerosos desafíos en los próximos años, y la transición a los contenedores refrigerados R290 tiene el potencial de abordar dos problemas importantes: R290 no tiene GWP ni propensión a formar TFA, lo que lo convierte en una tecnología crucial para explorar con el fin de garantizar un futuro sostenible y respetuoso con el ambiente.

# 6 El camino a seguir: ampliar la adopción del R290

El sector global de refrigeración, que abarca los contenedores refrigerados, está experimentando una transformación sustancial para alinearse con los objetivos de mitigación climática. Como parte de esta transición, el propano (R290) está emergiendo como un refrigerante natural prometedor debido a su bajo potencial de calentamiento global (GWP). Sin embargo, la transición a R290 no está exenta de desafíos, incluida la navegación por complejidades técnicas, económicas y regulatorias, así como numerosas barreras y la implementación de estrategias integrales de escalado. Este capítulo delinea las dimensiones fundamentales para fomentar la adopción del R290, con un enfoque en los aspectos técnicos, regulatorios, económicos y de mercado.

## 6.1 Barreras para la ampliación

La adopción de R290 en contenedores refrigerados está limitada por desafíos técnicos, consideraciones económicas y barreras institucionales. Se deben abordar los siguientes desafíos:

- **Desafíos técnicos:** Demostrar la viabilidad de un contenedor refrigerado con R290 altamente eficiente y garantizar su compatibilidad con los sistemas e infraestructuras de refrigeración existentes sigue siendo un obstáculo importante.
- **Problemas de seguridad:** El R290 es inflamable, lo que requiere un estricto cumplimiento de las normas de seguridad y los protocolos de manipulación adecuados.
- **Dinámica del mercado:** Las tecnologías competidoras con costos iniciales más bajos pueden retrasar la adopción sin los incentivos suficientes. Sin un caso de negocio positivo, las empresas no invertirán en sistemas R290.
- **Lagunas regulatorias y retraso en las políticas:** los retrasos en la aprobación y aplicación regulatoria ralentizan las transiciones del mercado.

## 6.2 Estrategias de ampliación para la adopción de R290 en contenedores refrigerados

La implementación exitosa de R290 a escala requiere una estrategia multifacética que abarque avances tecnológicos, marcos regulatorios, desarrollo de capacidades y participación en el mercado. La creación de prototipos y las pruebas de campo de los sistemas R290, junto con su integración en diseños avanzados de eficiencia energética, son fundamentales para superar los desafíos técnicos prevalentes. Al mismo tiempo, el establecimiento de marcos normativos internacionales y nacionales amplios, como los promovidos por la OMI, son fundamentales para el establecimiento de normas definitivas y la promoción de la adopción. Las iniciativas de creación de capacidades, incluida la capacitación de técnicos y los programas de sensibilización de las partes interesadas, garantizan un uso seguro y eficaz. Las estrategias de desarrollo de mercado enfatizan la colaboración con fabricantes y empresas de logística para fomentar la innovación y reducir las barreras de costos. Este enfoque integral enfatiza el camino que se requiere para transformar la industria de los contenedores refrigerados en una piedra angular de las tecnologías de enfriamiento sostenibles.

### • Desarrollo e implementación de tecnología:

- Creación de prototipos y pruebas de campo para sistemas con R290 (ver la sección 1.3.2 sobre futuros contenedores refrigerados con propano)
- Integración con diseños avanzados de eficiencia energética.

### • Apoyo regulatorio y normativo:

- Necesidad de regulaciones internacionales (por ejemplo, a través de la OMI u otras plataformas)
- Papel de las políticas nacionales y las iniciativas impulsadas por los gobiernos en apoyo de la transición rápida.

## 6 El camino a seguir: ampliar la adopción del R290

- **Desarrollo de capacidades:**

- Capacitaciones para personas técnicas sobre el manejo seguro y óptimo de refrigerantes naturales.
- Programas de sensibilización para actores clave, incluyendo compañías navieras y entes reguladores.

- **Oportunidades de financiación y creación de asociaciones.**

- Fomentar las asociaciones entre fabricantes y empresas de logística para un volumen de negocios financiero positivo y evitar malas inversiones en tecnología regulada más estricta.

### 6.2.1 Apoyo regulatorio y normativo

Los marcos globales juegan un papel fundamental en guiar a las industrias hacia prácticas sostenibles.

La transición a los sistemas refrigerados R290 representa una oportunidad significativa para que el sector del transporte marítimo refrigerado se alinee con los objetivos climáticos globales y las contribuciones determinadas a nivel nacional (NDC) en virtud del Acuerdo de París. Sin embargo, este cambio requiere una interacción efectiva y el apoyo de un marco regulatorio y político sólido tanto a nivel internacional como nacional para superar las barreras actuales e incentivar la adopción.

Por ejemplo, la OMI, como organismo clave que rige las emisiones del transporte marítimo, está en una posición única para acelerar la adopción de refrigerantes de bajo GWP como el R290 en sus marcos de eficiencia energética y descarbonización. Los siguientes esfuerzos coordinados a nivel internacional podrían crear una dirección clara para las compañías navieras, los fabricantes y los operadores, asegurando la alineación con los compromisos climáticos globales:

- Establecer directrices obligatorias específicas del sector para la transición a refrigerantes de bajo GWP.
- Facilitar el cumplimiento a través de incentivos como tarifas reducidas para los buques que utilizan tecnologías de contenedores refrigerados ecológicos.
- Colaboración con organizaciones y otros regímenes internacionales como el Protocolo de Montreal y el Acuerdo de París para armonizar las normas globales.

### Políticas Nacionales

A nivel nacional, los gobiernos deben articular entre los marcos globales y la implementación localizada para acelerar la adopción del gas refrigerante R290 en el sector de contenedores refrigerados. Esto se puede lograr a través de:

- 1. Integración de la modernización de los contenedores refrigerados en los planes de acción de refrigeración:** Las estrategias nacionales de refrigeración pueden incluir explícitamente el sector del transporte marítimo refrigerado, destacando su potencial para contribuir a los objetivos climáticos y de eficiencia energética.
- 2. Incentivar la adopción:** Las políticas fiscales como subsidios, beneficios fiscales y esquemas de depreciación acelerada pueden reducir la carga financiera de la adopción de tecnologías de R290 para las partes interesadas.
- 3. Establecimiento y actualización de MEPS (normas mínimas de eficiencia energética):** Las actualizaciones periódicas de MEPS pueden fomentar la innovación tecnológica continua y la adopción de sistemas compatibles con R290 y energéticamente eficientes.
- 4. Introducción de etiquetas y normas claras:** Los sistemas de etiquetado respetuosos con la energía y el ambiente pueden proporcionar al sector privado una orientación clara, lo que permite a las partes interesadas tomar decisiones informadas.

## 6 El camino a seguir: ampliar la adopción del R290

La eliminación gradual de los HCFC y la aplicación de medidas de eficiencia energética, junto con la Enmienda de Kigali al Protocolo de Montreal para la eliminación gradual de los HFC, han avanzado significativamente los esfuerzos mundiales para reducir el impacto climático de las tecnologías de refrigeración. Los países que han implementado políticas que cumplen con la enmienda de Kigali ya están presenciando una creciente adopción de refrigerantes verdes como el R290 en múltiples sectores, impulsados por el apoyo gubernamental y las iniciativas alineadas del sector privado. Estos ejemplos ponen de relieve la importancia de las políticas nacionales proactivas para crear condiciones favorables para las transiciones tecnológicas que promuevan la sostenibilidad y la eficiencia energética.

### 6.2.2 Desarrollo de capacidades de las contrapartes cruciales

#### Formación para técnicos

El éxito de la ampliación del R290 requiere el desarrollo de capacidades de todas las partes interesadas. Las personas técnicas deben estar equipadas con las habilidades para manejar y mantener de manera segura los sistemas de R290 en el puerto, así como en los buques portacontenedores o en la carretera/ferrocarril. Esto incluye abordar los riesgos de inflamabilidad antes mencionados y garantizar protocolos adecuados de instalación y mantenimiento. La adopción generalizada del R290 requiere una formación especializada certificada para garantizar la seguridad y la eficiencia en el manejo de este refrigerante inflamable.

Los componentes clave para este grupo objetivo deben incluir:

- Establecer programas de capacitación certificados que se centren en la instalación, el mantenimiento y la reparación de sistemas de R290 en el sector del transporte marítimo.
- Vincularse con escuelas vocacionales, asociaciones industriales y autoridades portuarias para expandir la fuerza laboral capacitada en el manejo de sistemas de contenedores refrigerados con refrigerantes naturales.
- Proporcionar módulos prácticos y en línea adaptados a los contextos regionales, aprovechando las mejores prácticas internacionales.
- Esquemas de incentivos para que el personal de servicio aspire a la certificación.

#### Programas de sensibilización

La concientización de las partes interesadas es fundamental para generar confianza y demanda de tecnologías R290. Los programas dirigidos a las compañías navieras, los responsables políticos y los operadores logísticos pueden aclarar los beneficios y los protocolos de seguridad de los sistemas de R290. Las campañas de concientización pueden disipar conceptos erróneos sobre las barreras de costos y rendimiento.

- **Compañías navieras:** demuestran los beneficios ambientales y de costos a largo plazo a través de resultados piloto y estudios de casos.
- **Reguladores:** destacan la alineación de la adopción del R290 con los objetivos climáticos nacionales y globales.
- **Campañas públicas:** muestran ejemplos exitosos para fomentar la aceptación y contrarrestar los conceptos erróneos sobre la seguridad.

## 6 El camino a seguir: ampliar la adopción del R290

### 6.2.3 Oportunidades de financiación y creación de asociaciones.

#### Mercados de carbono

El sector de los contenedores refrigerados puede aprovechar los mecanismos del Artículo 6 para negociar las reducciones de emisiones logradas a través de la adopción de R290. Por ejemplo:

- Establecer metodologías para cuantificar las emisiones ahorradas por contenedor.
- Interactuar con los compradores en mercados voluntarios o de cumplimiento para financiar las transiciones.

#### Iniciativas internacionales

Programas como la Iniciativa Internacional sobre el Clima (IKI) y el Fondo Verde para el Clima (GCF), la OMI, el Banco Mundial u otros ofrecen financiación para iniciativas que abordan el cambio climático y ofrecen apoyo a los países del Sur Global para adaptarse e implementar acciones de mitigación. Estas iniciativas podrían:

- Cofinanciar proyectos piloto para demostrar la viabilidad de los sistemas con R290.
- Proporcionar subvenciones para programas de desarrollo de capacidades y participación de las partes interesadas.
- Proporcionar subvenciones para la creación de un marco normativo internacional y nacional, así como para apoyar su aplicación.

#### Asociaciones público-privadas

Las asociaciones innovadoras y las asociaciones estratégicas pueden movilizar recursos y compartir riesgos:

- Colaboraciones entre gobiernos, proveedores de tecnología y empresas de logística para coinvertir en mejoras de infraestructura.
- Modelos de negocio como sistemas de arrendamiento con opción a compra o refrigeración, lo que reduce los costos iniciales para los adoptantes.
- Asociarse con fabricantes para integrar el R290 en las líneas de producción e innovar las características de seguridad.
- Involucrar a las empresas de logística para cofinanciar proyectos piloto y compartir conocimientos operativos.
- Desarrollar consorcios industriales para abordar colectivamente desafíos compartidos como las limitaciones de la cadena de suministro.

# 7 Conclusiones

La industria naviera mundial se encuentra en una encrucijada crítica, enfrentando una creciente presión para descarbonizarse mientras navega por las complejidades de un mercado en expansión. La urgencia de actuar nunca ha sido mayor: la elección de los refrigerantes determinará fundamentalmente la sostenibilidad del transporte marítimo refrigerado. Como subraya este informe, las emisiones de refrigerantes no son una preocupación menor, sino un tema central en la batalla para mitigar el cambio climático. El costo ambiental de las fugas de refrigerante, tanto directas como indirectas, es sustancial, lo que hace que la rápida transición a refrigerantes naturales y de GWP ultra bajo no sea negociable para el futuro del sector.

Uno de los desafíos más apremiantes que enfrenta la industria es el dilema sobre el TFA-CO<sub>2</sub>. Muchos refrigerantes sintéticos ampliamente utilizados, incluidos los HFC y los HFO, se descomponen en ácido trifluoroacético (TFA), una sustancia tóxica y persistente que plantea graves riesgos para la salud y el ambiente. Reducir las emisiones de gases de efecto invernadero sin considerar el impacto de los TFA podría empeorar inadvertidamente el daño ambiental. Los refrigerantes naturales como el propano (R290) y el dióxido de carbono (R744) ofrecen una solución inmediata y eficaz, eliminando este riesgo al tiempo que se alinean con los objetivos climáticos internacionales y los marcos regulatorios. Sin embargo, el mayor consumo de energía de los contenedores refrigerados R744 plantea otro desafío para los fabricantes de contenedores y las líneas navieras, y se necesitan ajustes para disminuir las emisiones generales del transporte marítimo. Estas alternativas no solo reducen significativamente el impacto ambiental, sino que también ofrecen un camino claro hacia el cumplimiento de los objetivos climáticos globales.

Este documento técnico destaca la necesidad urgente de adoptar refrigerantes naturales como el R290 y el

R744. Estas opciones proporcionan un GWP más bajo y se alinean con regulaciones internacionales críticas como la Enmienda de Kigali y el Reglamento de gases fluorados de la UE. El potencial de reducción de emisiones es profundo, con análisis de escenarios que predicen ahorros significativos de CO<sub>2</sub> equivalente para el año 2050. Sin embargo, para lograr estas reducciones, los gobiernos nacionales y los organismos internacionales como la OMI deben implementar urgentemente políticas que aceleren la transición a contenedores refrigerados ecológicos.

La necesidad de mejorar la sostenibilidad en la refrigeración marítima va más allá de la simple elección del gas refrigerante adecuado. Las mejoras en la eficiencia energética, las prácticas de mantenimiento y los estándares operativos son igualmente críticos para minimizar las emisiones. Las tecnologías que mejoran el control de la temperatura, las que reducen las fluctuaciones y optimizan el uso de la energía (como el aislamiento avanzado), los sistemas de control de vanguardia y la gestión de los elevadores de temperatura, son vitales. Estas mejoras no solo reducirán las emisiones indirectas, sino que también extenderán la vida útil de los contenedores refrigerados, disminuyendo su huella ambiental general. Los pasos que la industria naviera podría implementar incluyen:

#### **Desarrollo e implementación de tecnología:**

- Creación de prototipos y pruebas de campo para sistemas con R290.
- Integración con diseños avanzados de eficiencia energética.

#### **Apoyo regulatorio y normativo:**

- Crear reglas internacionales, por ejemplo, a través de la OMI, para guiar el cambio a tecnologías más ecológicas.
- Fortalecimiento de las políticas nacionales y los programas gubernamentales para acelerar la transición.

## 7 Conclusiones

### **Desarrollo de capacidades:**

- Capacitar a los técnicos para usar refrigerantes naturales de manera segura.
- Educar a las partes interesadas clave, como las compañías navieras y los reguladores, sobre los beneficios de las soluciones sostenibles.

### **Oportunidades de financiación y creación de asociaciones.**

- Fomentar las asociaciones entre fabricantes y empresas de logística para compartir conocimientos e impulsar la innovación.
- Un acuerdo entre navieras, fabricantes y clientes para evitar malas inversiones e identificar posibles sinergias.

Más allá de la elección de refrigerantes, la industria debe adoptar más medidas de mitigación. Las innovaciones en el diseño de contenedores refrigerados, como los componentes de eficiencia energética y el aislamiento mejorado, son clave para reducir las emisiones. Al optimizar el control de la temperatura, reducir los aumentos de temperatura y refinar las prácticas de mantenimiento, el sector puede disminuir significativamente el consumo de energía y las emisiones. Cuando se combinan con refrigerantes naturales, estas medidas presentan una solución integral y sostenible para la refrigeración marítima.

Para abordar los desafíos de la industria de manera efectiva, la colaboración global es esencial. El establecimiento de estándares internacionales, el intercambio de datos y el fomento de iniciativas transfronterizas ayudarán a crear una estrategia cohesiva para reducir las emisiones y mejorar la sostenibilidad. Al trabajar juntas, las partes interesadas pueden garantizar una transición fluida y efectiva hacia tecnologías más ecológicas. Los gobiernos nacionales y las organizaciones internacionales como la OMI deben adoptar políticas y

regulaciones que apoyen la rápida transición del sector de la refrigeración marítima a contenedores refrigerados ecológicos.

Esta transformación exige una acción urgente y unificada en toda la industria. La Alianza de Transición a Contenedores Refrigerados Ecológicos, liderada por GIZ y Kuehne Climate Center, juega un papel fundamental en la aceleración de la adopción de tecnologías sostenibles. Al facilitar la colaboración, compartir conocimientos y abordar los desafíos regulatorios y técnicos, la Alianza está impulsando una estrategia cohesiva para el cambio.

El momento de actuar es ahora. Los fabricantes que invierten en refrigerantes sintéticos por razones de costo pronto se enfrentarán a la realidad de la necesidad de cambiar a opciones más sostenibles. El cambio hacia refrigerantes naturales como el R290 es inevitable y ofrece una solución con visión de futuro. Aunque persisten obstáculos como la inflamabilidad y la alineación regulatoria, las pruebas exitosas de prototipos y las evaluaciones de riesgos demuestran que estos desafíos son superables. Las partes interesadas deben priorizar las inversiones en tecnologías basadas en R290, desarrollar estándares de seguridad sólidos y centrarse en el desarrollo de capacidades a través de la capacitación y la educación.

En conclusión, la transición a Contenedores Refrigerados Ecológicos no es solo un desafío tecnológico, es una oportunidad fundamental para redefinir el futuro del transporte marítimo. Al priorizar los refrigerantes naturales, mejorar la eficiencia operativa y apoyar la colaboración global, la industria naviera puede cumplir sus objetivos climáticos y evitar las trampas de los refrigerantes sintéticos. El momento de actuar es ahora: el camino a seguir es un futuro sostenible y respetuoso con el clima para el transporte marítimo refrigerado.

# Bibliografía

## A

Acciaro, M., T. Vanelslander, C. Sys, C. Ferrari, A. Roumboutsos, G. Giuliano, J.S.L. Lam, and S. Kapros. 2014. Sostenibilidad ambiental en los puertos marítimos: un marco para una innovación exitosa. *Política y Gestión Marítima* 41 (5): 480–500.

ASHRAE (2022). ANSI/ASHRAE Norma 15-2022. Norma de seguridad para sistemas de refrigeración. Consultado el 3 de mayo, 2024, de *ASHRAE 15-2022 (packaged w/Standard 34-2022)* | *ASHRAE Store (accuristech.com)*

## B

Beasley, M.G., Holborn, P.G., Ingram, J.M., Maidment, G.G. (2018). Causa, consecuencias y prevención de incendios frigoríficos en viviendas residenciales. *Revista de seguridad contra incendios*, Vol 102, 66-76.

Behringer, D., Heydel, F., Gschrey, B., Osterheld, S., Schwarz, W., Warncke, K., Freeling, F., Nödler, K., Henne, S., Reimann, S., Blepp, M., Jörß, W., Liu, R., Ludig, S., Rüdener, I., & Gartiser, S. (2021). Productos de degradación persistentes de refrigerantes halogenados y agentes espumantes en el medio ambiente: tipo, concentraciones ambientales y destino, con especial atención a los nuevos sustitutos halogenados con bajo potencial de calentamiento atmosférico (ISSN 1862-4804). Agencia Alemana para el Medio Ambiente.

Behringer, D., Martens, K., & Gschrey, B. (2023). Recuperación de refrigerantes fluorados de equipos RAC fuera de servicio en Alemania: implicaciones para la notificación nacional de emisiones en virtud de la CMNUCC. *Atmósfera*, 15(1), 35. <https://doi.org/10.3390/atmos15010035>

Brunn, H., Arnold, G., Körner, W., Rippen, G., Steinhäuser, K. G., & Valentin, I. (2023). PFAS: sustancias químicas para siempre: persistentes, bioacumulables y móviles. Revisar el estado y la necesidad de su eliminación gradual y remediación de sitios contaminados. *Ciencias Ambientales Europea*, 35(1). <https://doi.org/10.1186/s12302-023-00721-8>

Budiyanto, M. A., & Shinoda, T. (2018). El efecto de la radiación solar en el consumo de energía de los contenedores refrigerados. Casos prácticos de ingeniería térmica, 12, 687–695. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.09.005>

## C

Carel Industries. (2020, July 7). Cómo usar TEWI para comparar el impacto ambiental de un sistema de refrigeración. Consultado el 15 de mayo, 2024, de *Cómo usar TEWI para comparar el impacto ambiental de un sistema de refrigeración (carel.com)*

Carrier Transicold. (n.d.). PrimeLINE® Unidad de refrigeración de contenedores | Carrier. *PrimeLINE® Unidad de refrigeración de contenedores | Carrier Transicold*

Carrier Transicold (n.d.). NaturaLINE® Unidad de refrigeración de contenedores | Carrier. Consultado el 3 de mayo, 2024, de *NaturaLINE® Unidad de refrigeración de contenedores | Carrier Transicold*

Castelein, B., Geerlings, H., & Van Duin, R. (2020). El mercado de contenedores refrigerados y la investigación académica: un estudio de revisión. *Revista de Producción Más Limpia*, 256, 120654. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120654>

Alternativas respetuosas con el clima a los HFC. (n.d.). Acción Climática. Consultado el 6 de mayo, 2024, de *Alternativas respetuosas con el clima a los HFC - Comisión Europea (europa.UE)*

Chu-Van, T., Ristovski, Z., Pourkhesalian, A. M., Rainey, T., Garaniya, V., Abbassi, R., Jahangiri, S., Enshaei, H., Kam, U., Kimball, R., Yang, L., Zare, A., Bartlett, H., & Brown, R. J. (2018). Mediciones a bordo de emisiones de partículas y gases de un gran buque de carga en diferentes condiciones de operación. *Contaminación ambiental*, 237, 832–841. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.008>

Conrad, Jobst (1995): Greenfreeze: éxito medioambiental por accidente y acción estratégica, In: Martin Jänicke, Helmut Weidner (Ed.): Política medioambiental exitosa: una evaluación crítica de 24 casos, ISBN 3-89404-136-6, Edition Sigma, Berlin, pp. 364-378

Asociación de Propietarios de Contenedores, COA, & COA Reefer Forum Work Group. (2022). CONTENEDORES REFRIGERADOS: CUESTIONES REGLAMENTARIAS RELATIVAS A LOS GASES FLUORADOS REFRIGERANTES. In COA (Report). Asociación de Propietarios de Contenedores. <https://www.containerownersassociation.com/wp-content/uploads/2018/03/TG-08-Reefer-Containers-Regulatory-Issues-Concerning-Refrigerant-F-Gases.pdf>

Cooling Post 25.02.2025, *Significant price rise for higher GWP refrigerants - Cooling Post*

## Bibliografía

### D

Duan, H., Miller, T. R., Liu, G., Zeng, X., Yu, K., Huang, Q., Zuo, J., Qin, Y., & Li, J. (2018). Perspectiva alarmante: Efectos del cambio climático de refrigerantes mal administrados en China. *Ciencia y Tecnología Ambiental*, 52(11), 6350–6356. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b05987>

Dynamar (2020) Estructura del mercado de análisis de contenedores refrigerados, convencional, contenedores. *Dynamar-2020-Reefer-Analysis-Contents-Overview-and-Introduction.pdf*

### E

ECHA. (2024, 13 de marzo). Próximos pasos para la propuesta de restricción de PFAS. Consultado el 14 de mayo, 2024, de *All news - ECHA (europa.eu)*

EPA. (2017). MODELOS VIEJOS DE LA EPA DE SUBSTITUTOS DE LAS ODS. *EPA'S VINTAGING MODEL OF ODS SUBSTITUTES: A Summary of the 2017 Peer Review*

Agencia Europea de Sustancias y Mezclas Químicas(2023, March 22). ANEXO XV INFORME SOBRE RESTRICCIONES - PROPUESTA DE RESTRICCIÓN. Consultado el 3 de mayo, 2024, de *Annex XV reporting format 040615 (europa.eu)*

Comisión Europea 19.10.2023, Artículo de noticias de la Dirección General de Medio Ambiente *Health and environmental impacts prompt a call for strict ruling on ubiquitous 'forever chemicals'*

Agencia Europea del Ambiente (EEA) Background Document (24.02.2024) Results of Quarterly survey: Quarter 4/2024 *Reports - Fluorinated Greenhouse Gases - Climate Action*

EUR-Lex (2024). Regulación (UE) 2024/573 sobre los gases fluorados de efecto invernadero, por el que se modifica la Directiva (UE) (2019)/1937 y se deroga el Reglamento (UE) No 517/2014. Consultado el 3 de mayo, 2024, de *Regulation - EU - 2024/573 - EN - EUR-Lex (europa.eu)*

Regulación (UE) 2023/1805 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 13 de septiembre de 2023, relativo al uso de combustibles renovables e hipocarbónicos en el transporte marítimo, y por el que se modifica la Directiva 2009/16/CE (*Regulation - 2023/1805 - EN - EUR-Lex*)

Everitt, N. (2023, Febrero 13). La prohibición de PFAS afecta a la mayoría de las mezclas de refrigerantes. *Cooling Post*. <https://www.coolingpost.com/world-news/pfas-ban-affects-most-refrigerant-blends/>

### F

Feller Michael, Lux Karin, Hohenstein Christian, Kornath Andreas (2014). Estructura y propiedades del 2,3,3,3-tetrafluoropropeno (HFO-1234yf). *Zeitschrift für Naturforschung B*, 2014; 69b: 379 DOI: 10.5560/ZNB.2014-4017

Forster, P., T. Storelvmo, K. Armour, W. Collins, J.-L. Dufresne, D. Frame, D.J. Lunt, T. Mauritsen, M.D. Palmer, M. Watanabe, M. Wild, and H. Zhang, (2021): El presupuesto energético de la Tierra, las retroalimentaciones climáticas y la sensibilidad climática. En *Cambio climático 2021: la base de la ciencia física*. Contribución del Grupo de Trabajo I al sexto informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, EE.UU.: pp. 923–1054, doi: [10.1017/9781009157896.009](https://doi.org/10.1017/9781009157896.009).

Freeling, F., & Björnsdotter, M. K. (2023). Evaluación de la presencia ambiental del contaminante antropogénico ácido trifluoroacético (TFA). *Opinión actual en química verde y sostenible*, 41, 100807. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2023.100807>

### G

Ge, Y., & Tassou, S. (2011). Análisis termodinámico de sistemas de refrigeración con booster de CO<sub>2</sub> transcrito en supermercado. *Conversión y gestión de energía*, 52(4), 1868–1875. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.11.015>

Giroto, S., Minetto, S., & Nekså, P. (2004). Sistema de refrigeración comercial que utiliza CO<sub>2</sub> como refrigerante. *Revista Internacional de Refrigeración*, 27(7), 717–723. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2004.07.004>

## Bibliografía

- GIZ Proklima (2018): Normas Internacionales de Seguridad en Aire Acondicionado, Refrigeración y Bomba de Calor. [https://www.green-cooling-initiative.org/fileadmin/Publications/240923\\_GIZ-C4\\_ProjectReport\\_Philippines\\_final.pdf](https://www.green-cooling-initiative.org/fileadmin/Publications/240923_GIZ-C4_ProjectReport_Philippines_final.pdf)
- Consejo Global de Emisiones Logísticas Marco para la contabilidad y presentación de informes de emisiones de logística V3.1 (2024) [GLEC\\_FRAMEWORK\\_v3\\_UPDATED\\_04\\_12\\_24.pdf](https://www.glec.org/glec-framework-v3-updated-04-12-24.pdf)
- Godwin, D. S., & Ferenchiak, R. (2020). The implications of the residential use of hydrofluorocarbons in the United States. *Journal of Environmental & Development*, 29(3), 29–44. [https://doi.org/10.1080/1943815x.2020.1768551](https://doi.org/10.1080/10801943815x.2020.1768551)
- Green Car Congress News 11.04.2014: Un estudio de LMU revela que el 20% de los gases de la combustión del refrigerante R1234yf MAC consisten en fluoruro de carbono altamente tóxico (Corrección y actualización) *Un estudio de LMU revela que el 20% de los gases de la combustión del refrigerante R1234yf MAC consisten en fluoruro de carbono altamente tóxico (Corrección y actualización) - Green Car Congress*
- Iniciativa de enfriamiento verde - Home. (n.d.-b). Consultado el 3 de mayo, 2024, de *Iniciativa de enfriamiento verde - Home* ([green-cooling-initiative.org](https://www.green-cooling-initiative.org))
- Gullo, P., Elmegaard, B., & Cortella, G. (2016). Evaluación del rendimiento energético y medioambiental de los sistemas de refrigeración de supermercados con booster R744 que funcionan en climas cálidos. *Revista Internacional de Refrigeración*, 64, 61–79. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.12.016>
- IEC Webstore (2019): IEC 60335-2-89:2019. Disponible en: <https://webstore.iec.ch/publication/62243> (Consultado el July 15, 2020).
- Organización Marítima Internacional (1974). Convenio Internacional para la Seguridad de la Vida Humana en el Mar (SOLAS). Consultado el 3 de mayo, 2024, de *Convenio Internacional para la Seguridad de la Vida Humana en el Mar (SOLAS), 1974* ([imo.org](https://www.imo.org))
- Organización Marítima Internacional (2020). Cuarto Estudio de GEI OMI 2020. In *Fourth Greenhouse Gas Study 2020* ([imo.org](https://www.imo.org)). Organización Marítima Internacional.
- Organización Marítima Internacional (n.d.). OMI 2020 – Reducción de las emisiones de óxido de azufre. *OMI 2020 – Reducción de las emisiones de óxido de azufre*
- Organización Marítima Internacional (2023). Estrategia de la OMI sobre la reducción de las emisiones de GEI de los buques. *2023 Estrategia de la OMI sobre la reducción de las emisiones de GEI de los buques*
- Organización Marítima Internacional *Ozone-depleting substances (ODS) – Regulation 12* ([imo.org](https://www.imo.org))
- Instituto para la Gobernanza y el Desarrollo Sostenible (IGSD), News 10.02.2025, *How R-290 Cooling is Transforming the Automotive Sector and Fighting Super Pollutants - Institute For Governance & Sustainable Development*
- Internationale Klimaschutzinitiative (IKI). (n.d.) Contenedores refrigerados en el transporte marítimo internacional. Consultado el 3 de mayo, 2024, de *Contenedores refrigerados en el transporte marítimo internacional | Internationale Klimaschutzinitiative (IKI)* ([international-climate-initiative.com](https://www.international-climate-initiative.com))
- IPCC (2005): Informe especial sobre la protección del ozono y el sistema climático mundial. De Jager, D., Kuijpers, L., Manning M. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, EEUU. Disponible en: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/sroc\\_full-1.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/sroc_full-1.pdf)
- IPCC (2021) Assessment Report 6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis. by Smith, C., Z.R.J. Nicholls, K. Armour, W. Collins, P. Forster, M. Meinshausen, M.D. Palmer, and M. Watanabe, Contribución del Grupo de Trabajo I al sexto informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, y B. Zhou (eds.)]. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*

## Bibliografía

ISO 1496-2:2018 (2018) Contenedores de carga de la serie 1 — Especificación y pruebas. Parte 2: Contenedores térmicos. *ISO 1496-2:2018 - Series 1 freight containers — Specification and testing — Part 2: Thermal containers* ISO 13043:2011. (2011). ISO. Consultado el 2 de mayo, 2024, de

*ISO 13043:2011 - Road vehicles — Refrigerant systems used in mobile air conditioning systems (MAC) — Safety requirements*

ISO 20854:2019. (2019). ISO. Consultado el 2 de mayo, 2024, de *ISO 20854:2019 - Thermal containers — Safety standard for refrigerating systems using flammable refrigerants — Requirements for design and operation*

### J

Jeschke, S., Instituto de Gestión de la Información en Ingeniería Mecánica IMA, & IMA – RWTH Aachen University. (2011). Tendencias globales en rutas de transporte y transporte de mercancías: influencia en las futuras unidades de carga internacionales. Informe de Discusión- 16 Th AcEA sAG MEETInG – Junio 2011. [https://www.acea.auto/files/SAG\\_16\\_Global\\_Trends\\_in\\_Transport\\_Routes\\_\\_Goods\\_Transport.pdf](https://www.acea.auto/files/SAG_16_Global_Trends_in_Transport_Routes__Goods_Transport.pdf)

### K

Kim, K., Park, K., Lee, J., Chun, K., & Lee, S. (2018). Análisis de un buque portacontenedores híbrido de batería/generador para la reducción de CO<sub>2</sub>. IEEE Acceso, 6, 14537–14543. <https://doi.org/10.1109/access.2018.2814635>

König, Holger (2013), Intermodal Europe Hamburg Messe Tecnologías de refrigeración del futuro con refrigerantes naturales. Comparación de eficiencia energética – seguridad – estándares y costos.(brindado por el autor)

König, H., Bararu M. (2014). Evaluación de riesgos para contenedores refrigerados con refrigerantes inflamables. 11<sup>th</sup> IIR Gustav Lorentzen Conferencia sobre Refrigerantes Naturales *Evaluación de riesgos para contenedores refrigerados con refrigerantes inflamables. - pap. ID109*

König, H., Bararu, M., & Holtappels, K. (2016). Pruebas prácticas con R290 utilizadas en pruebas de fugas de refrigeración de contenedores refrigerados. 12<sup>th</sup> IIR Gustav Lorentzen Conferencia sobre Refrigerantes Naturales. *Pruebas prácticas con R290 utilizadas en pruebas de fugas de refrigeración de contenedores refrigerados. - pap. 1138*

### L

Laganis, E., Seeton, C. J., Leck, T. J., Senediak, J., Dugard, P. H., Low, B., Sethi, A., & ASHRAE. (2019). ANSI/ASHRAE Adenda F a la Norma ANSI / ASHRAE 34-2019. *ANSI/ASHRAE Adenda f a la Norma ANSI / ASHRAE 34-2019*

Lawton, A.R., Mynott, T., Marshall, N, M. (2015). Agentes espumantes aislantes de bajo GWP y métodos de medición de la eficiencia. iifir.org. <https://doi.org/10.18462/iir.icr.2015.0575>

Liebherr News 11.06.2024, Liebherr suministra por primera vez sistemas HVAC basados en propano producidos en serie, *Liebherr suministra por primera vez sistemas HVAC basados en propano producidos en serie - yLiebherr*

Li, Y., Yang, J., Wu, X., Li, Y., Zhuang, Y., Zhou, P., Han, X., & Chen, G. (2023). Características de fuga, difusión y distribución del refrigerante en un espacio limitado: una revisión integral. Progreso de la ciencia térmica y la ingeniería, 40, 101731. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101731>

Li, Y., Yang, J., Wu, X., Li, Y., Zhou, P., Yan, Y., & Han, X. (2023). Investigación sobre las características de la intensidad de campo y el área inflamable de las fugas de refrigerantes en un espacio confinado. Revista Internacional de Refrigeración, 153, 308–322. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.05.015>

308–322. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.05.015>  
Lundsgaard, C. A., Madsen, K., Hansen, B., Götz, T., Barthel, C., Gokarakonda, S., Viegand Maagøe A/S, The Wuppertal Institute, Mines ParisTech / Armines, Viegand, J., & Thuring, M. (2020). Estudio preparatorio sobre Contenedores Refrigerados: Informe de las Tareas 1 y 2. En Estudio preparatorio sobre contenedores refrigerados: Informe de las tareas 1 y 2. [https://www.energimyndigheten.se/globalassets/energieffektivisering\\_/jag-ar-saljare-eller-tillverkare/dokument/produkter-med-krav/kylcontainrar/refrigerated-containers-prep-study\\_task-1---2-and-alternative-policy-options\\_report\\_-\\_2020-06.pdf](https://www.energimyndigheten.se/globalassets/energieffektivisering_/jag-ar-saljare-eller-tillverkare/dokument/produkter-med-krav/kylcontainrar/refrigerated-containers-prep-study_task-1---2-and-alternative-policy-options_report_-_2020-06.pdf)

Lukasse, L., Schouten, R., Castelein, B., Lawton, R. A., Paillart, M., Guo, X., Woltering, E., Tromp, S., Snels, J., & Defraeye, T. (2023). Perspectivas sobre la evolución de los contenedores refrigerados para el transporte de productos frescos. Tendencias en Ciencia y Tecnología de los Alimentos, 140, 104147. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104147>

## Bibliografía

### M

Maersk ahora está considerando el R1234yf como un futuro refrigerante para contenedores refrigerados. (2018, Noviembre 17). Consultado el 6 de mayo, 2024, de *Maersk ahora está considerando el R1234yf como un futuro refrigerante para contenedores refrigerados (refindustry.com)*

Industria de Contenedores Maersk. (2022, Septiembre 15). Refrigerantes - Industria de Contenedores Maersk. Industria de Contenedores Maersk -. Consultado el 3 de mayo, 2024, de *Refrigerants - Maersk Container Industry (mcicontainers.com)*

Industria de Contenedores Maersk. (2023, Octubre 17). R1234YF y su relevancia para la industria de los contenedores refrigerados. Consultado el 6 de mayo, 2024, de *R1234YF y su relevancia para la industria de los contenedores refrigerados | LinkedIn*

Markel, A. (2022, August 19). Comprendiendo el nuevo refrigerante R1234YF. Revista de Revisión de Llantas. Consultado el 6 de mayo, 2024, de *Comprendiendo el nuevo refrigerante R1234YF (tirereview.com)*

Minetto, S., Fabris, F., Marinetti, S., & Rossetti, A. (2023). Una revisión de las oportunidades actuales y futuras de fluidos de trabajo naturales en refrigeración de transporte. *Revista Internacional de Refrigeración*, 152, 343–355. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.04.015>

Meyer, J. P. (2001). El rendimiento de los refrigerantes R-134a, R-290, R404A, R-407C y R-410A en aires acondicionados y frigoríficos. *Strojniški Vestnik - Revista de Ingeniería Mecánica*, 47(8), 366–373. <https://www.sv-jme.eu/article/the-performance-of-the-refrigerants-r-134a-r-290-r404a-r-407c-and-r-410a-in-air-conditioners-and-refrigerators/>

Mueller, R., & Schlosser, K. E. (2020). Historia y uso de sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas (PFAS) que se encuentran en el medio ambiente. Consultado el Junio 25, 2024, de *Historia y uso de sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas (PFAS) que se encuentran en el medio ambiente (itrcweb.org)*

### O

OzonAction & PNUMA. (2016). La Enmienda de Kigali al Protocolo de Montreal: eliminación gradual de los HFC. In *OZONACTION FACT SHEET*. Consultado el Junio 12, 2024, de *unep-fact-sheet-kigali-amendment-to-mp.pdf (3m.com)*

Ozone Secretariat. (2018). El potencial para mejorar la eficiencia energética de la refrigeración, el aire acondicionado y las bombas de calor. *briefingnote-b\_potential-to-improve-the-energy-efficiency-of-refrigeration-air-conditioning-and-heat-pumps.pdf (unep.org)*

### P

Pabón, J. J. G., Khosravi, A., Belman-Flores, J., Machado, L., & Revellin, R. (2020). Aplicaciones del refrigerante R1234yf en sistemas de calefacción, aire acondicionado y refrigeración: una década de investigaciones. *Revista Internacional de Refrigeración*, 118, 104–113. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.06.014>

Pei, R., Xie, J., Zhang, H., Sun, K., Wu, Z., & Zhou, S. (2021). Metodologías Robustas de gestión y control de energía multicapa para el parque de contenedores refrigerados en la terminal portuaria. *Energías*, 14(15), 4456. <https://doi.org/10.3390/en14154456>

Purohit, P., Höglund-Isaksson, L., Borgford-Parnell, N., Klimont, Z., & Smith, C. J. (2022). El papel clave del propano en un sector de refrigeración sostenible. *Actas de la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos de América*, 119(34). <https://doi.org/10.1073/pnas.2206131119>

### R

Refrigerantes. (n.d.). Linde (anteriormente AGA) Gases Industriales. [https://www.linde-gas.se/en/products\\_refrigerants/index.html](https://www.linde-gas.se/en/products_refrigerants/index.html)

### S

Sarr, J., Dupont, J.-L., Guilpart, J., & IIFIR. (2021). La huella de carbono de la cadena de frío, 7ª nota informativa sobre refrigeración y alimentación. In <https://iifir.org/en/fridoc/the-carbon-footprint-of-the-cold-chain-7-lt-sup-gt-th-lt-sup-gt-informatory-143457>. Instituto Internacional de Refrigeración. <https://doi.org/10.18462/iir.infood07.04.2021>

## Bibliografía

Spengler, T., & Wilmsmeier, G. (2019). Desempeño sostenible y evaluación comparativa en terminales de contenedores: la dimensión energética. In Elsevier eBooks (pp. 125–154). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-814054-3.00007-4>

Superradiatorcoils, 10.03.2022: *R-290: Pros, Cons, & Comparisons to R22, R404A, & R134a | Super Radiator Coils*

Syam, M. M., Cabrera-Calderon, S., Vijayan, K. A., Balaji, V., Phelan, P. E., & Villalobos, J. R. (2022). Mini contenedores para mejorar la eficiencia energética de la cadena de frío y la huella de carbono. *Clima*, 10(5), 76. <https://doi.org/10.3390/cli10050076>

### T

Trane Technologies' Thermo King reducirá el potencial de calentamiento global de la refrigeración del transporte en casi un cincuenta por ciento. (n.d.). Consultado el 3 de mayo, 2024, de *Trane Technologies' Thermo King reducirá el potencial de calentamiento global de la refrigeración del transporte en casi un cincuenta por ciento | Trane Technologies*

Trane Technologies. (2021). SuperFreezer. In Thermo King. Consultado el 7 de mayo, 2024, de *SuperFreezer Brochure (English) (thermoking.com)*

### U

Umweltbundesamt (Agencia Alemana para el Medio Ambiente) (2021). Reducción de la entrada de productos químicos en las aguas: trifluoroacetato (TFA) como sustancia persistente y móvil con muchas fuentes (ISSN 2363-829X). por: Adlunger, K., Anke, J. M., Bachem, G., Banning, H., Biegel-Engler, A., Blondzik, K., Braun, U., Eckhardt, A., Gildemeister, D., Hilliges, F., Hoffmann, G., Jentzsch, F., Klitzke, S., Kuckelkorn, J., Martens, K., Müller, A., Pickl, C., Pirntke, U., Rechenberg, J., Wischer, R. *Background 11/2021: Reducción de la entrada de productos químicos en las aguas: trifluoroacetato (TFA) como sustancia persistente y móvil con muchas fuentes (umweltbundesamt.de)*

Hoja informativa 1 de ONU Medio Ambiente y ASHRAE "Actualización sobre nuevas designaciones de refrigerantes y clasificaciones de seguridad" Noviembre 2022 *UNEP/ASHRAE Refrigerant Fact Sheet #1—Update on New Refrigerants Designations and Safety Classifications*

PNUMA, 2017: Aplicación de las normas de seguridad a RACHP. Disponible en: <https://ozone.unep.org/sites/default/files/2019-08/application-of-safety-standards-to-RACHP.pdf> (Accessed July 17, 2020) (Consultado el 17 de Julio, 2020)

### V

Van Duin, R., Geerlings, H., Verbraeck, A., & Nafde, T. (2018). Enfriamiento: Un enfoque de simulación para reducir los picos de energía de los contenedores refrigerados en las terminales. *Revista de Producción Más Limpia*, 193, 72–86. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.258>

Van Duin, R., Geerlings, H., Tavasszy, L., & Bank, D. (2019). Factores que causan el consumo máximo de energía de los contenedores refrigerados en las terminales de contenedores. *Revista de Transporte Marítimo y Comercio*, 4(1). <https://doi.org/10.1186/s41072-019-0040-y>

Vuppaladadiyam, A. K., Antunes, E., Vuppaladadiyam, S. S. V., Baig, Z. T., Subiantoro, A., Lei, G., Leu, S., Sarmah, A. K., & Duan, H. (2022). Progreso en el desarrollo y uso de refrigerantes y consecuencias ambientales no deseadas. *Ciencia del Medio Ambiente Total* 823, 153670. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153670>

### W

Investigación de alimentos y base biológica de Wageningen, Certificación ATO de contenedores refrigerados, Universidad e Investigación de Wageningen, consultado el 15 de Febrero 2024, <https://www.reefertransport.nl/>

Wang, Zhiguo, Chengzhu Wang, Yuebin Gao, Zhao Li, Yu Shang, and Haifu Li. (2023). "Materiales de espuma de poliuretano de aislamiento térmico poroso" *Polímeros* 15, no. 18: 3818. <https://doi.org/10.3390/polym15183818>

Wang, Y., Feng, L., Wang, J., Zhao, H., & Liu, P. (2022). Previsión de tendencias tecnológicas y descubrimiento de oportunidades tecnológicas basadas en minería de textos: el caso de la tecnología de contenedores refrigerados. *Procesos*, 10(3), 551. <https://doi.org/10.3390/pr10030551>

Organización Meteorológica Mundial (OMM). Evaluación científica del agotamiento de la capa de ozono: (2022), GAW Reporte No. 278, 509 pp.; OMM: Ginebra, 2022

WorldCargo News. (2018, Noviembre 12). MCI puts propane on ice > WorldCargo News. WorldCargo News > Sitio líder para la industria de manejo de carga. Consultado el 6 de mayo, 2024, de *MCI puts propane on ice > WorldCargo News*

## Y

Yadav, S., Liu, J., & Kim, S. C. (2022). Un estudio exhaustivo sobre los refrigerantes del siglo XXI - R290 y R1234yf: una revisión. *Revista Internacional de Transferencia de Calor y Masa/Revista Internacional de Transferencia de Calor y Masa*, 182, 121947. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121947>

## Z

Złoczowska, E. (2018). Estudio de fallas en la planta de refrigeración de contenedores marítimos. *Nuevas tendencias en ingeniería de producción*, 1(1), 589–595. [https://www.researchgate.net/publication/329418419\\_Maritime\\_Containers\\_Refrigeration\\_Plant\\_Faults\\_Survey](https://www.researchgate.net/publication/329418419_Maritime_Containers_Refrigeration_Plant_Faults_Survey)

Złoczowska, E. (2018). EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LOS CONTENEDORES REFRIGERADOS TRANSPORTADOS POR MAR. *Geoconferencia Científica Multidisciplinaria Internacional SGEM . . .* <https://doi.org/10.5593/sgem2018/4.2/s19.043>

GIZ Proklima (2017) Guía de desmontaje manual para frigoríficos y aires acondicionados [https://www.international-climate-initiative.com/fileadmin/Dokumente/2017/171219\\_ES-weee-colombia.pdf](https://www.international-climate-initiative.com/fileadmin/Dokumente/2017/171219_ES-weee-colombia.pdf)

GIZ Proklima (2018) Normas internacionales de seguridad para aire acondicionado, refrigeración y bombeo de calor [https://www.green-cooling-initiative.org/fileadmin/user\\_upload/Publications/ES\\_International\\_Safety\\_Standards\\_in\\_Air\\_Conditioning\\_\\_Refrigeration\\_\\_and\\_Heat\\_Pump.pdf](https://www.green-cooling-initiative.org/fileadmin/user_upload/Publications/ES_International_Safety_Standards_in_Air_Conditioning__Refrigeration__and_Heat_Pump.pdf)

GIZ Proklima (2015) Tecnologías de enfriamiento ecológico: tendencias del mercado en subsectores seleccionados de refrigeración y aire acondicionado [https://www.giz.de/en/downloads/giz2015\\_en\\_gci\\_study\\_market\\_trends.pdf](https://www.giz.de/en/downloads/giz2015_en_gci_study_market_trends.pdf)

GIZ Proklima (2012) Buenas prácticas de refrigeración <https://www.ctc-n.org/sites/www.ctc-n.org/files/researches/giz2011-es-buenas-practicas-de-refrigeracion.pdf>

GIZ Proklima (2012) Directrices para el uso seguro de refrigerantes de hidrocarburos. Un manual para ingenieros, técnicos, formadores y políticos - Para una refrigeración amigable con el clima. [https://www.green-cooling-initiative.org/fileadmin/Publications/2012\\_Proklima\\_Guidelines\\_for\\_the\\_safe\\_use\\_of\\_hydrocarbons.pdf](https://www.green-cooling-initiative.org/fileadmin/Publications/2012_Proklima_Guidelines_for_the_safe_use_of_hydrocarbons.pdf)

# Anexos

## 8 Escenario detallado de mitigación de emisiones

Con el fin de visualizar y comprender el potencial de reducción de las emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> mediante la implementación de un contenedor refrigerado ecológico, el proyecto ha calculado una disminución potencial teórica de las emisiones de CO<sub>2</sub>eq que podría lograrse mediante el uso de un contenedor refrigerado con R290 y una mayor eficiencia energética en varios escenarios. La base de esta estimación fue establecida por la base de datos ATO de la Universidad de Wageningen, que proporcionó datos cruciales sobre el tamaño de la flota de contenedores refrigerados, la participación de refrigerantes y la tasa de crecimiento.<sup>146</sup>

El cálculo de las emisiones totales se realiza de acuerdo con los principios de la fórmula TEWI (Impacto total equivalente del calentamiento). Esta fórmula abarca tanto las emisiones directas como las indirectas, lo que proporciona una evaluación exhaustiva del impacto ambiental de la producción de energía.<sup>147</sup>

En el contexto de los sistemas de refrigeración, las emisiones directas son atribuibles a dos fuentes principales: en primer lugar, la fuga de los refrigerantes empleados durante el funcionamiento y, en segundo lugar, su eliminación al final de su vida útil.

Las emisiones indirectas exhiben una proporcionalidad directa con el consumo de energía, dada la intensidad de carbono asociada al combustible o la tecnología empleada para la generación de electricidad necesaria en el funcionamiento de los contenedores refrigerados. Para facilitar este cálculo, las emisiones indirectas se definen como las emisiones que se producen durante el tiempo de viaje y se estiman en función del equivalente de CO<sub>2</sub> de la intensidad de carbono del combustible del

buque. La estimación de las emisiones directas se deriva de la fuga de refrigerante durante las fases de operación y desmantelamiento de los contenedores térmicos. Estas ecuaciones se aplicaron para todos los años n desde 2018 hasta 2050 para todas las unidades en operación y para las unidades que se espera que sean desmanteladas. También es pertinente señalar que ciertas variables han sido designadas con el subíndice, dado que sus valores están sujetos a alteraciones a lo largo de los años designados n.

$$TEWI_n = \text{Emisiones Directas } (DE_n) + \text{Emisiones Indirectas } (IE_n)$$

$$DE_n = \text{Fuga}_n + \text{Fin de Vida}_n$$

$$\text{Fuga}_n = GWP_{avg,n} [kg_{ref}/kg_{CO_2eq}] \times \text{carga } [kg_{ref}] \times \text{tasa de fuga } [\%]$$

$$\text{Fin de Vida}_n = GWP_{avg,n-15} [kg_{ref}/kg_{CO_2eq}] \times \text{carga } [kg_{ref}] \times (1 - \text{Tasa de recuperación} - \text{tasa de fuga}) [\%]$$

$$IE = \text{demanda de potencia base}_n [kW] \times \text{horas de operación } [h] \times \text{intensidad de carbono}_n [kg_{CO_2eq}/kWh]$$

146 Investigación de alimentos y base biológica de Wageningen, Certificación ATO de contenedores refrigerados, Universidad e Investigación de Wageningen, Consultado el 2 Mayo, 2024, de [Reefertransport - Home](#)

147 Carel Industries. (2020, July 7). Cómo usar TEWI para comparar el impacto ambiental de un sistema de refrigeración. Consultado el 15 Mayo, 2024, fde [Cómo usar TEWI para comparar el impacto ambiental de un sistema de refrigeración \(carel.com\)](#)

## 8 Escenario detallado de mitigación de emisiones

El razonamiento matemático empleado para el cálculo de las emisiones de ácido trifluoroacético (TFA) a partir de la descomposición de los refrigerantes emitidos fue coherente con la metodología descrita anteriormente. Las emisiones de TFA se estimaron con la información presentada en la Tabla 4. En los casos en que se trata de mezclas de refrigerantes, la emisión de TFA se calcula en función de la composición de la mezcla.

Tabla 9. Emisiones de TFA calculadas para refrigerantes relevantes en contenedores refrigerados<sup>148, 149, 150</sup>

Refrigerante	equivalencia TFA
R134a	0,2
R404A	0,06
R452A	0,3
R513A	0,648
R1234yf	1
R744	0
R290	0

Los siguientes parámetros fundamentales del cálculo se estimaron utilizando datos de la base de datos ATO, literatura académica y comentarios de la industria. Para estimar la tasa de crecimiento, se observó la diferencia relativa interanual en contenedores construidos cada año, de 2003 a 2023. Se encontró que la media de la diferencia relativa interanual era cercana al 8%, por lo que se seleccionó como la tasa de crecimiento estimada para 2050.

La mayoría de la literatura existente y los comentarios de la industria coinciden en que la vida útil media de una unidad refrigerada es de alrededor de 15 años.<sup>151</sup> Es importante tener en cuenta que esta cifra se utiliza para estimar el tamaño de la flota calculando la suma de todos los nuevos frigoríficos construidos anualmente. La cifra de la base de datos de la ATO se corrigió con la estimación de la Organización Marítima Internacional (OMI) del tamaño de la flota refrigerada en 2018, que fue de 2,49 millones de contenedores refrigerados.<sup>152</sup> Esta corrección se utilizó para estimar la composición de la flota refrigerada de los últimos 15 años, unidades que posteriormente se considerarían dadas de baja en el cálculo a partir de 2018.

La base de datos de la ATO demostró ser una valiosa fuente de información, en particular los registros de las proporciones de refrigerantes por año. Estos registros eran específicos y proporcionaban una base sobre la cual se podían desarrollar posibles programas futuros de uso de refrigerantes.

Las suposiciones sobre los parámetros básicos se derivaron de la investigación académica y los comentarios de expertos de la industria. La tasa de fuga se estableció en 15%, lo que representa una estimación más conservadora en comparación con el 25% utilizado en otros estudios. La intensidad de carbono de la electricidad generada a bordo del buque se estima en 0,7 kgCO<sub>2</sub>/kWh, lo que refleja los motores típicos del transporte marítimo, aunque un análisis más amplio arrojó una cifra de 0,91 kgCO<sub>2</sub>/kWh. Se supone que las horas anuales de funcionamiento en el mar son de 4.800 para este cálculo de emisiones, aunque esto puede reducirse a 3.840 horas de funcionamiento dependiendo del operador. La carga de refrigerante es de 5 kg por unidad, con una tasa de

148 Behringer, D., et al. (2021). Productos de degradación persistentes de refrigerantes halogenados y agentes espumantes en el medio ambiente: tipo, concentraciones ambientales y destino, con especial atención a los nuevos sustitutos halogenados con bajo potencial de calentamiento atmosférico.

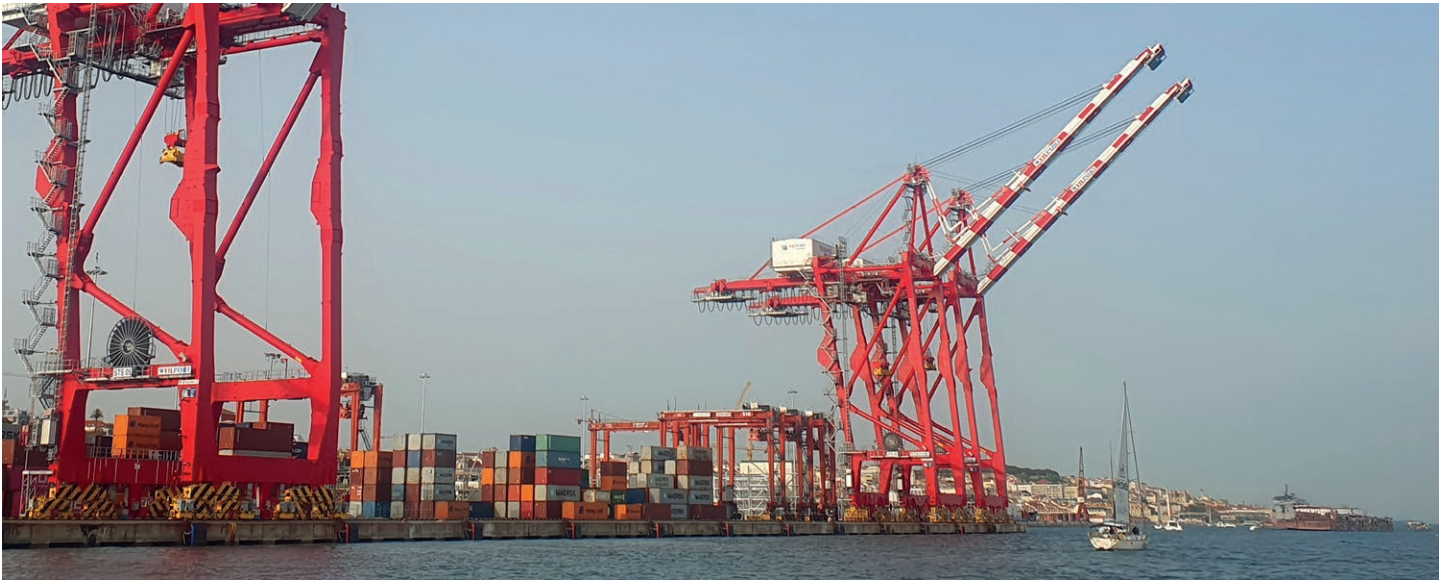
149 Harrison, J. J., et al. (2021). Quince años de observaciones satelitales HFC-134a: comparaciones con cálculos SLIMCAT. *Revista de Investigación Geofísica: Atmósferas* 126 (8)

150 Yi, L., et al. (2023). Observación atmosférica y emisiones de HFC-134a en China y sus cuatro ciudades. *Environ. Sci. Technol.* 57 (12).

151 Lundsgaard, C. A., et al. (2020). Estudio preparatorio sobre Contenedores Refrigerados: Informe de las Tareas 1 y 2. En *Estudio preparatorio sobre contenedores refrigerados: Informe de las tareas 1 y 2.*

152 OMI. (2020). Cuarto estudio de GEI de la OMI 2020. In *Fourth Greenhouse Gas Study 2020 (imo.org).*

## 8 Escenario detallado de mitigación de emisiones



Una vista del puerto de Lisboa, Portugal © GIZ / Kirsten Orschulok

recuperación del 60% en el momento del desmantelamiento. La demanda de energía base es de 2,5 kW y la vida útil del sistema se proyecta en 15 años. Se estima que las ganancias potenciales de eficiencia oscilan entre el 7,5% y el 20%.

La tasa de fuga considerada en esta publicación se utiliza en base a la literatura pública disponible y, debido a la falta de datos directos, verificados y confiables relacionados con las pérdidas de refrigerante de los sistemas, se supone que es un valor conservador y también típico de otras aplicaciones de refrigeración de transporte.

A medida que la industria ha madurado y entrado en la era digital, hoy en día es posible medir diferentes parámetros que se consideran en los escenarios calculados. A medida que la industria sea más transparente y se disponga de datos, también se podrá reconsiderar el impacto de las emisiones. Si calculáramos los escenarios en función de un tiempo de operación espe-

cífico de una hora, el potencial de mitigación tendría el mismo impacto en términos de magnitud perceptiva. El impacto de todos y cada uno de los contenedores podría calcularse en función de la operación de datos reales.

Las emisiones indirectas asumidas para la operación de 4.800 horas requieren diferenciar entre encendido y apagado, lo que no se indicó claramente en el documento de investigación al que se hace referencia.

Podemos modificar esta situación introduciendo un parámetro de entrada de varianza, que va de 2,000 a 5,000 horas de operación anuales que define los límites para el cálculo de los límites inferior y superior de emisiones. Dependía de la elección del modelador utilizar un sistema R290 con características adicionales para mejorar el rendimiento energético. El objetivo del estudio es proponer un sistema energético eficiente, especialmente con R290. Por supuesto, otros refrigerantes podrían beneficiarse de varias mejoras.

## 8 Escenario detallado de mitigación de emisiones

Tabla 10. Descripción de los principales supuestos

Nombre	Descripción	Valor	Unidad
<b>Carga de Refrigerante</b>	Valor habitual del refrigerante para la operación de un contenedor refrigerado.	5 <sup>153, 154</sup>	kg
<b>Tasa de fuga</b>	Fuga de refrigerante en un año de un contenedor refrigerado.	15 <sup>155, 156</sup>	%
<b>Tasa de Recuperación</b>	Refrigerante recuperado en el desmantelamiento. Muy influenciado por la formalidad del sector servicios. Se considera una figura conservadora.	60 <sup>157, 158, 159, 160</sup>	%
<b>Demanda de potencia base</b>	Demanda de energía operativa base del contenedor refrigerado.	2,5 <sup>161, 162, 163, 164, 165</sup>	kW
<b>Horas de operación en mar</b>	Estimación de viajes cargados en un año.	4.800 <sup>166</sup>	horas
<b>Intensidad de carbono</b>	Intensidad de carbono de la energía del barco, utilizada para proporcionar electricidad al contenedor refrigerado.	0,7 <sup>167, 168, 169</sup>	kgCO <sub>2</sub> eq / kWh
<b>Tiempo de vida</b>	Vida útil estimada de un contenedor refrigerado.	15 <sup>170, 171</sup>	años
<b>Ganancia de eficiencia</b>	En los escenarios, se proponen ganancias de eficiencia. Se propone un rango posible de mejora considerando técnicas o métodos que podrían aplicarse a todos los contenedores refrigerados (aislamiento y control de temperatura), y algunos exclusivamente para R290.	7,5–20 <sup>172, 173</sup>	%

153 Ibid.

154 Zloczowska, E. (2018). EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LOS CONTENEDORES REFRIGERADOS TRANSPORTADOS POR MAR. Geoconferencia Científica Multidisciplinaria Internacional SGEM

155 Ibid.

156 Modelo de envejecimiento de EPA para los sustitutos de SAO. *EPA'S VINTAGING MODEL OF ODS SUBSTITUTES. Un resumen de la revisión de pares de 2017.*

157 Behringer, D., Martens, K., & Gschrey, B. (2023). Recuperación de refrigerantes fluorados de equipos RAC fuera de servicio en Alemania: implicaciones para la notificación nacional de emisiones en virtud de la CMNUCC. *Atmósfera*, 15(1), 35.

158 Godwin, D. S., & Ferenchiak, R. (2020). Las implicaciones de la elección del refrigerante del aire acondicionado residencial en el consumo futuro de hidrofluorocarbonos en los Estados Unidos. *Revista de Ciencias Ambientales Integrativas*, 17(3), 29–44.

159 De Aguiar Peixoto, R., et al. (2005). IPCC/TEAP Informe especial: Salvaguardia de la capa de ozono y del sistema climático mundial. In M. Kaibara & A. D. Pasek (Eds.), IPCC/TEAP Informe especial: Salvaguardia de la capa de ozono y del sistema climático mundial (p. 271). *SROC Chapter 5 (ipcc.ch)*

160 Duan, H., Miller, et al. (2018). Perspectiva alarmante: Efectos del cambio climático de refrigerantes mal administrados en China. *Ciencia y Tecnología Ambiental*, 52(11), 6350–6356.

161 Budiyo, M. A., & Shinoda, T. (2018). El efecto de la radiación solar en el consumo de energía de los contenedores refrigerados. *Casos prácticos de ingeniería térmica*, 12, 687–695.

162 Van Duin, R., et al. (2019). Factores que causan el consumo máximo de energía de los contenedores refrigerados en las terminales de contenedores. *Revista de Transporte Marítimo y Comercio*, 4(1).

163 Pei, R., Xie, J., Zhang, H., Sun, K., Wu, Z., & Zhou, S. (2021). Metodologías Robustas de gestión y control de energía multicapa para el parque de contenedores refrigerados en la terminal portuaria. *Energies*, 14(15), 4456.

164 Syam, M. M., et al. (2022). Mini contenedores para mejorar la eficiencia energética de la cadena de frío y la huella de carbono. *Clima*, 10(5), 76.

165 Kim, K., et al. (2018). Análisis de un buque portacontenedores híbrido de batería/generador para la reducción de CO<sub>2</sub>. *IEEE Access*, 6, 14537–14543.

166 Zloczowska, E. (2018). EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LOS CONTENEDORES REFRIGERADOS TRANSPORTADOS POR MAR. Geoconferencia Científica Multidisciplinaria Internacional SGEM

167 Ibid.

168 Acciano, M., T. Vanelislander, C. Sys, C. Ferrari, A. Rouboutsos, G. Giuliano, J.S.L. Lam, and S. Kapros. 2014. Sostenibilidad ambiental en los puertos marítimos: un marco para una innovación exitosa. *Política y Gestión Marítima* 41 (5): 480–500.

169 Nguyen, K. T., et al. (2022). CO<sub>2</sub> emissions in a global container shipping network and policy implications. *Maritime Economics & Logistics*, 26, 151–167.

170 Lundsgaard, C. A., et al. (2020). Estudio preparatorio sobre Contenedores Refrigerados: Informe de las Tareas 1 y 2. En Estudio preparatorio sobre contenedores refrigerados: Informe de las tareas 1 y 2.

171 Coments de industry partners.

172 Ozone Secretariat. (2018). El potencial para mejorar la eficiencia energética de la refrigeración, el aire acondicionado y las bombas de calor. *briefingnote-b\_potential-to-improve-the-energy-efficiency-of-refrigeration-air-conditioning-and-heat-pumps.pdf (unep.org)*

173 Minetto, S., et al. (2023). Una revisión de las oportunidades actuales y futuras con fluidos de trabajo naturales en refrigeración de transporte.

## 8 Escenario detallado de mitigación de emisiones

### 8.1 Exploración de escenarios

Se realizó una revisión de la literatura sobre el tema para el propósito de este documento, con un enfoque particular en el potencial de mitigación. Esta revisión reveló una escasez de estudios realizados en el sector de la refrigeración y el aire acondicionado (RAC) en general. Si bien existen ejemplos notables de desarrollo de unidades de aire acondicionado tipo splits en el hogar,<sup>174</sup> tales ejemplos son menos frecuentes en el sector de la refrigeración y, según el conocimiento de los autores, no existe ninguno. En consecuencia, hay una ausencia de escenarios establecidos o reconocidos para modelar estas aplicaciones y equipos. Por lo tanto, a los efectos de este potencial de mitigación en particular, se seleccionaron ciertas variables con el fin de probar y explorar diferentes escenarios posibles.

La mayoría de los supuestos clave se consideran parámetros del modelo. En consecuencia, no se contempla ninguna mejora en el sector de servicios dentro del presente ejercicio, lo que lleva a una tasa de fuga, tasa de recuperación, carga de refrigerante y vida útil constantes en el transcurso de todos los años. Además, se plantea la hipótesis de que el número de días de funcionamiento se mantendrá constante, anulando así cualquier mejora en la logística del transporte, un problema importante dada la propensión de los contenedores refrigerados a viajar descargados repetidamente. La exploración de escenarios mediante la combinación de variables dio como resultado 30 escenarios posibles.

Es importante señalar que las variables en cuestión están sujetas a cambios continuos anualmente, con el objetivo de alcanzar metas predeterminadas para los años relevantes según lo estipulado en el cronograma. Este proceso de iteración entre los años especificados es un aspecto fundamental de la metodología.

### 8.2 Escenarios de adopción de refrigerante R290

El contenedor refrigerado ecológico que se está considerando por su potencial de mitigación emplea R290 como refrigerante. El escenario inicial postula un escenario en el que no se adopta el contenedor refrigerado ecológico, mientras que dos escenarios alternativos exploran diferentes tasas de aceptación: adopción lenta y rápida. En estos escenarios, las unidades refrigeradas con R290 se integran en la flota total como porcentaje de nuevas unidades refrigeradas cada año. Se ha demostrado que el uso de R290 da como resultado una reducción del potencial de calentamiento atmosférico (GWP) promedio de la flota, lo que conduce a una disminución de las emisiones directas, incluido el TFA.

Tabla 11. Calendario de adopción de R290, en porcentaje de nuevas unidades

Año	Sin R290	Lento R290	Rápido R290
2025	0,00	0,00	0,00
2030	0,00	5,00	10,00
2040	0,00	10,00	20,00
2050	0,00	20,00	50,00

#### 8.2.1 Ganancias en eficiencia energética

El nivel posterior de combinaciones se refiere a la mejora de la eficiencia de los contenedores refrigerados, una medida que resultará en una reducción del consumo de energía y, en consecuencia, de las emisiones indirectas. Se han identificado numerosas estrategias como posibles vías para mejorar la eficiencia, incluida la implementación de medidas de aislamiento mejoradas, el desarrollo de nuevos inversores y compresores, la op-

174 Purohit, P., et al. (2022). El papel clave del propano en un sector de refrigeración sostenible.

## 8 Escenario detallado de mitigación de emisiones

timización de los sistemas de control de temperatura, la integración de mecanismos de monitoreo, el diseño de programas específicos para productos básicos, la racionalización de los procesos logísticos portuarios y la colocación estratégica de contenedores refrigerados en los buques de acuerdo con la trayectoria del buque y la posición del sol.<sup>175</sup>

Se ha teorizado que el potencial de mejora de la eficiencia en estas metodologías alcanza hasta el 35%.<sup>176</sup> Con respecto al R290, varios estudios han establecido sus notables propiedades termodinámicas tanto para aplicaciones refrigeradas como congeladas, lo que sugiere una mejora potencial de la eficiencia del 15-30% en comparación con el R404A.<sup>177</sup>

Se propone que se haga una estimación conservadora de la mejora de la base para todos los contenedores refrigerados, y que se considere una ganancia moderada y alta para los contenedores refrigerados R290 (ver Tabla 7).

Tabla 12. Programa de ganancias de eficiencia energética, en porcentaje de disminución del consumo de energía

Año	Eficiencia base	R290 ganancia moderada de eficiencia moderada	R290 ganancia alta de eficiencia alta
2025	0,00	0,00	0,00
2030	2,00	5,00	10,00
2040	5,00	7,50	15,00
2050	7,50	10,00	20,00

175 Ozone Secretariat. (2018). El potencial para mejorar la eficiencia energética de la refrigeración, el aire acondicionado y las bombas de calor. *briefing-note-b\_potential-to-improve-the-energy-efficiency-of-refrigeration-air-conditioning-and-heat-pumps.pdf* (unep.org)

176 Ibidem.

177 Ibid.

### 8.2.2 Programas de uso de refrigerante

La pregunta fundamental que este modelo busca abordar es la trayectoria proyectada del uso de refrigerantes en el futuro. En segundo lugar, es crucial determinar cómo afectarán estos cambios a las emisiones directas.

Para abordar estos desafíos, se consideraron tres programas de reducción gradual y un programa de eliminación gradual de refrigerantes. Los tres calendarios de reducción gradual corresponden a la Enmienda de Kigali, al Reglamento de la UE sobre gases fluorados y a un escenario en el que no se sigue ningún calendario específico. El escenario de eliminación gradual se aplica en caso de que no se cumplan los objetivos de reducción de la intensidad de las emisiones de la OMI. Se espera que el impacto de estos cronogramas en la producción de nuevas unidades sea significativo, mientras que se proyecta que las unidades existentes continúen operando hasta el final de su ciclo de vida designado. La composición actual del refrigerante de los contenedores refrigerados es predominantemente R134a, lo que complica el cumplimiento de cualquier cronograma predeterminado.

Tabla 13. Proporción promedio de refrigerantes de nuevos contenedores refrigerados en los últimos cinco años (2019-2023) y su valor GWP 100 años<sup>178</sup>

R134a	R404A	R452A	R513A	R744
97,80%	1,68%	0,18%	0,03%	0,31%
1.530	4.728	2.292	673	1

178 Investigación de alimentos y base biológica de Wageningen, Certificación ATO de contenedores refrigerados, Universidad e Investigación de Wageningen, consultado el 15 febrero 2024, *Reefertransport - Home*.

## 8 Escenario detallado de mitigación de emisiones

El calendario más ambicioso es el que ha propuesto el último Reglamento de la UE sobre gases fluorados, cuya aplicación estaba prevista para el 11 de marzo de 2024.<sup>179</sup>

La proporción actual de refrigerantes indica que cumplir con el plazo estipulado será un desafío considerable. Para la mayoría de las aplicaciones, la fecha límite al año 2030 estipula la prohibición de todos los equipos con un GWP superior a 150 o 750, dependiendo de la categoría aplicable a los frigoríficos. Reconociendo el desafío de cumplir con este plazo, se ha propuesto un cronograma alternativo con cierto grado de compromiso. Se supone que los equipos de refrigeración también estarán cubiertos por este reglamento, lo que requerirá que la industria elimine gradualmente los gases fluorados en consecuencia.

Tabla 14. Programa inspirado en el Reglamento de gases fluorados de la UE, porcentaje de uso de refrigerante en nuevos contenedores refrigerados sin R290

Año	R134a	R404A	R452A	R513A	R744	R1234yf
2025	95	1	1	1	1	1
2030	15	0	10	20	15	40
2040	0	0	5	10	20	60
2050	0	0	0	0	25	75

El acuerdo mundial más pertinente relativo al uso de refrigerantes es la Enmienda de Kigali al Protocolo de Montreal.<sup>180</sup> La siguiente tabla proporciona una descripción completa de la producción, consumo, exportaciones e importaciones de refrigerantes. Delinea el método de cálculo para establecer una línea de base y los pasos de reducción porcentual de acuerdo con la línea de base. El establecimiento de la línea de base para los nuevos equipos de refrigeración se facilitó aprovechando los datos históricos de la base de datos de la ATO. Es crítico tener en cuenta que el cronograma estipulado es aplicable exclusivamente a los nuevos equipos de refrigeración.

Tabla 15. Programa inspirado en la Enmienda de Kigali, proporción en el uso de refrigerantes en los nuevos contenedores refrigerados

Año	R134a	R404A	R452A	R513A	R744	R1234yf
2028	90,33	1,67	3,00	5,00	0,00	0,00
2032	81,29	1,50	2,70	4,5	2,00	8,00
2037	72,26	1,50	2,40	4,00	4,00	16,00
2042	63,23	1,17	2,10	3,50	6,00	24,00
2047	13,55	0,25	0,45	0,75	17,00	68,00
2050	7,00	0,00	0,00	0,00	20,00	73,00

179 REGLAMENTO (UE) 2024/573 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO, de 7 de febrero de 2024, sobre los gases fluorados de efecto invernadero, por el que se modifica la Directiva (UE) 2019/1937 y se deroga el Reglamento (UE) n.º 517/2014. (2024, febrero). <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/573/oj>

180 OzonAction y PNUMA. (2016). La Enmienda de Kigali al Protocolo de Montreal: eliminación gradual de HFC. En HOJA INFORMATIVA DE OZONACTION. Consultado el 12 de junio de 2024 de PNUMA-fact-sheet-kigali-amendment-to-mp.pdf (3m.com)

## 8 Escenario detallado de mitigación de emisiones

Finalmente, se formuló el peor de los casos. Este calendario es simplemente un incumplimiento del calendario de Kigali.

Tabla 16. Calendario de incumplimiento, proporción de uso de refrigerante en los nuevos contenedores refrigerados

Año	R134a	R404A	R452A	R513A	R744	R1234yf
2025	95,00	1,00	3,00	1,00	0,00	0,00
2030	90,00	1,00	4,00	5,00	0,00	0,00
2040	75,00	1,00	2,00	10,00	2,40	9,60
2050	25,00	0,00	0,00	10,00	13,00	52,00

Es imperativo reconocer que estos calendarios se modelan junto con la introducción de R290. La proporción de R290 se incorpora disminuyendo las proporciones de todos los demás refrigerantes de manera proporcional. La siguiente ecuación es aplicable a cada refrigerante en el contexto de la adopción de R290:

$$\text{Proporción de refrigerante} = \text{Proporción original del programa} \times (1 - \text{Proporción de adopción R290})$$

La incorporación de R290 da como resultado alteraciones en la proporción agregada de refrigerantes novedosos dentro de cada programa en diversos escenarios. Por ejemplo, en la Tabla 17, se demuestra el impacto de la Enmienda de Kigali y la adopción acelerada de R290 en la composición de las listas.

Tabla 17. Programa inspirado en la Enmienda de Kigali, proporción en el uso de refrigerantes en los nuevos contenedores refrigerados, incluyendo la rápida adopción de R290

Año	R134a	R404A	R452A	R513A	R744	R1234yf	R290
2025	96,65	1,35	0,75	1,25	0,00	0,00	0,00
2030	77,23	1,43	2,57	4,28	0,90	3,60	10,00
2040	53,48	0,99	1,78	2,96	4,16	16,64	20,00
2050	3,50	0,00	0,00	10,00	10,00	36,50	50,00

### 8.2.3 Objetivos de reducción de la intensidad de las emisiones de la OMI

Finalmente, el nivel final de exploración de escenarios se refiere a la cuestión de si el sector cumple o no con los objetivos de reducción de la intensidad de las emisiones de la OMI. Los objetivos propuestos representan una iteración preliminar y, como tal, son excesivamente amplios para la industria naviera en su conjunto. La distribución de las reducciones de emisiones en todas las posibles medidas de mitigación sigue siendo ambigua.

A efectos de este cálculo, los objetivos incluyen una reducción de la intensidad de carbono de la electricidad consumida por los contenedores refrigerados a bordo. El análisis de escenarios considera dos posibles resultados: uno en el que la reducción de la intensidad de carbono se alinea con los objetivos propuestos, y otro en el que la reducción no alcanza los objetivos establecidos.

Tabla 18. Programa para la reducción de la intensidad de carbono de acuerdo con los objetivos de reducción de la OMI

Año	Objetivos OMI según lo planeado	Objetivos OMI no va según lo planeado
2030	40,00	30,00
2050	70,00	60,00

## 8 Escenario detallado de mitigación de emisiones

El siguiente diagrama (Figura 11) ilustra el proceso de combinación que representó los 30 escenarios explorados.

Figura 11. Ilustración de la exploración del escenario



## 8 Escenario detallado de mitigación de emisiones

### 8.3 Resultados

#### 8.3.1. Emisiones de gases de efecto invernadero

El análisis del potencial de reducción indica que los objetivos de reducción de la intensidad de las emisiones de la OMI tienen el mayor impacto en el consumo de energía de los contenedores refrigerados. En consecuencia, la identificación de los escenarios con las emisiones más bajas y más altas se llevó a cabo bajo este supuesto. Inicialmente, se identificaron los escenarios con el mejor potencial de reducción de emisiones y los escenarios con las emisiones más altas. Se observa que todos los escenarios incluyen la mezcla de refrigerantes actual en la flota, como se mencionó en el capítulo anterior.

Tabla 19. Resumen de escenarios

Escenario	OMI	gas F	Eficiencia	adopción R290
S4	Si	Si	Alto	rápido
S11	Si	No	Base	No
S19	No	Si	Alto	rápido
S26	No	No	Base	No

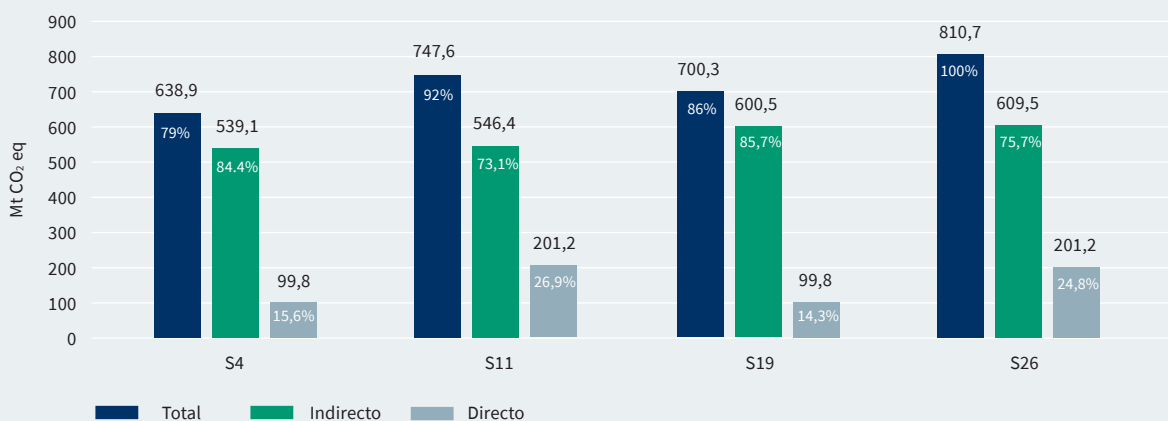
De acuerdo con la estrategia descrita por la OMI, las emisiones más bajas se logran mediante el cumplimiento de las normas de gases fluorados de la UE, las ganancias sustanciales de eficiencia energética de la flota y la introducción expedita de R290 en el mercado. Las proyecciones indican emisiones acumuladas de 638,92 Mt CO<sub>2</sub>eq para el año 2050 (Escenario 4, S4). El escenario de emisiones más altas se alinea con la estrategia de la

OMI, pero no incorpora la implementación de políticas adicionales, como la Enmienda de Kigali o el Reglamento de gases fluorados de la UE. Este escenario también supone que no se introducirá en el mercado el R290 ni que la eficiencia energética de la flota de contenedores refrigerados, con emisiones acumuladas de 747,64 Mt CO<sub>2</sub>eq para 2050 (Escenario 11, S11). El escenario 19 (S19) no se alinea con la estrategia de la OMI, pero demuestra reducciones significativas de emisiones debido a la combinación del cumplimiento de los gases fluorados de la UE, las mejoras de alta eficiencia energética y la rápida adopción del mercado del R290. Estos factores conducen a emisiones acumuladas de 700,3 Mt CO<sub>2</sub>eq para 2050, lo que subraya el papel fundamental de las ganancias de eficiencia y las transiciones de refrigerantes.

El escenario con las emisiones acumuladas más altas para 2050 con 810,74 Mt de CO<sub>2</sub>eq no sigue ninguna regulación de política, asume que no se introducirá ningún mercado de contenedores refrigerados R290 ni una mejora de la tecnología de contenedores refrigerados para 2050, y no tiene en cuenta las ganancias de eficiencia energética en absoluto (Escenario 26, S26). El escenario final no se alinea con la estrategia de la OMI; sin embargo, incorpora el impacto del Reglamento de gases fluorados de la UE en la combinación de refrigerantes de la flota de contenedores refrigerados, supone una mejora sustancial de la eficiencia energética de la flota en los años previos a 2050 e incorpora la introducción en el mercado de los contenedores refrigerados R290. Las emisiones proyectadas para 2050 se estiman en 700,3 Mt CO<sub>2</sub>eq, que es marginalmente menor que en el Escenario 11. Este resultado subraya la importancia de la reducción del consumo de energía en contenedores refrigerados en el perfil general de emisiones.

## 8 Escenario detallado de mitigación de emisiones

Figura 12. Comportamiento de las emisiones directas e indirectas de los escenarios seleccionados, promedio de todos los años analizados



Los análisis demuestran además el impacto del Reglamento de la UE sobre gases fluorados y la Enmienda de Kigali en las emisiones de los contenedores refrigerados: en caso de que la industria de la refrigeración no tenga en cuenta estas directivas, se prevé que las emisiones de los refrigerantes se dupliquen (ver

Figura 20). La sustitución de refrigerantes en la flota de contenedores refrigerados por refrigerantes naturales como el CO<sub>2</sub> o el R290 supondría la eliminación de estas emisiones.

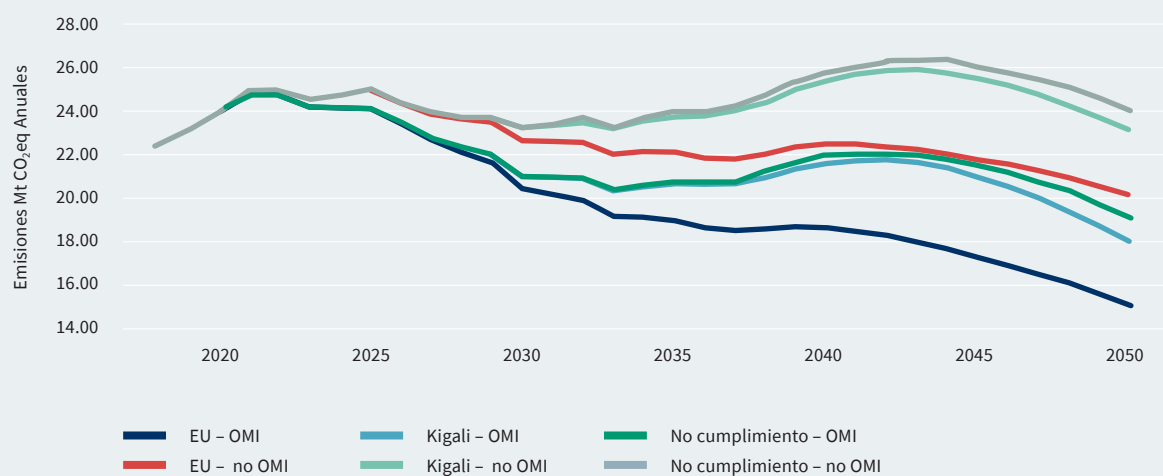
La discrepancia entre el mejor escenario posible y el escenario en el que se alcancen los niveles más altos de emisiones acumuladas para 2050 es de 171,8 Mt CO<sub>2</sub>eq. Esto equivale a las emisiones de 40 centrales eléctricas de carbón en un año. Es importante señalar que esta reducción de emisiones depende de dos factores clave: en primer lugar, la industria debe aumentar la eficiencia energética de la tecnología de refrigeración; y, en segundo lugar, el R290 debe introducirse rápidamente en el mercado. En particular, este análisis no considera medidas adicionales que podrían mejorar significativamente el potencial de reducción de emisiones, como el desarrollo de tecnologías avanzadas de motores en furgonetas o la adopción del hidrógeno como fuente de combustible, entre otras.

Tabla 20. Resumen de Emisiones

Emisiones	Unidad	Escenarios			
		S4	S11	S19	S26
Directo	MtCO <sub>2</sub> eq	99,8	201,2	99,8	201,2
Indirecto	MtCO <sub>2</sub> eq	539,1	546,4	600,5	609,5
Total	MtCO <sub>2</sub> eq	638,9	747,6	700,3	810,7
D%	%	15,6	26,9	14,3	24,8
I%	%	84,4	73,1	85,7	75,2

## 8 Escenario detallado de mitigación de emisiones

Figura 13. Emisiones anuales de escenarios promedios y su variabilidad



Con el fin de ilustrar la magnitud potencial de las reducciones de emisiones dentro de los diferentes escenarios, se agrupan en cinco escenarios diferentes en función de su alineación con los objetivos de la OMI y los programas de reducción gradual de refrigerantes. Dentro de cada grupo, las variaciones surgen de las diferencias en las ganancias de eficiencia y la tasa de adopción del refrigerante R290. El escenario caracterizado por las mayores ganancias de eficiencia y la rápida adopción de R290 constituye el límite inferior de la variabilidad de cada grupo, mientras que el escenario con ganancias de eficiencia de referencia y ninguna adopción de R290 forma el límite superior. Las áreas sombreadas alrededor de cada curva en la Figura 13 ilustran el rango de variabilidad debido a las diferentes velocidades de implementación de la tecnología de R290.

El impacto de la Enmienda de Kigali y el Reglamento de gases fluorados de la UE se muestra en la apariencia escalonada de las curvas hasta aproximadamente 2037-2040. Después de este período, la disminución más gradual de las curvas significa que la influencia de

los refrigerantes está disminuyendo, y las ganancias de eficiencia junto con las reducciones de la intensidad de carbono se convierten en los impulsores predominantes de la reducción de emisiones.

El compromiso de la industria naviera con la estrategia de la OMI está destinado a ser el impulsor más importante del desarrollo de contenedores refrigerados. Con la implementación de las medidas de seguridad necesarias, la industria puede hacer la transición a los contenedores refrigerados con R290, ejerciendo un impacto positivo sustancial en su balance de emisiones a largo plazo. Si bien los combustibles actuales incluyen diésel y varios combustibles, las opciones futuras de descarbonización pueden incluir electrificación, combustibles a base de hidrógeno, GNL, biocombustibles, metanol y amoníaco.

Los análisis de reducción de emisiones demuestran el impacto de la introducción de la tecnología R290 en el mercado, junto con objetivos de menor consumo de energía para los contenedores refrigerados. Los

## 8 Escenario detallado de mitigación de emisiones

Figura 14. Emisiones máximas estimadas de TFA en toneladas/año para el grupo relevante de productos químicos. Si bien las fuentes naturales como los respiraderos hidrotermales contribuyen a las emisiones globales de TFA, actualmente no se dispone de datos regionales para Alemania y Europa, lo que deja solo estimaciones globales<sup>182, 183</sup>



contenedores refrigerados más ecológicos, caracterizados por un menor consumo de energía y el uso de R290 como refrigerante, son fundamentales para ayudar a la industria naviera a alcanzar los objetivos de descarbonización de la OMI, de acuerdo con el Acuerdo de París y el compromiso con un futuro sostenible.

### 8.3.2 'Productos químicos eternos' y contenedores refrigerados

Los llamados "productos químicos eternos", específicamente PFAS, son subproductos químicos de R134a o R1234yf que se liberan a la atmósfera. El R134a se utiliza en el 96% de los equipos de refrigeración del mercado actual, mientras que el R1234yf se utiliza en sistemas de aire acondicionado móviles.

PFAS, acrónimo de sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas, son sustancias químicas sintéticas que se han utilizado en diversos productos industriales y de consumo desde la década de 1950. Estos productos químicos son conocidos por su resistencia a la degradación en el ambiente y su capacidad para acumularse en el cuerpo humano.<sup>183</sup> El TFA se forma como un producto de degradación de PFAS y, por lo tanto, forma parte de los HCFC y los HFC, y ahora se identifica en los HFO.

En Alemania, las principales fuentes de TFA se identifican actualmente como refrigerantes y propulsores empleados en sistemas móviles de aire acondicionado (ver Figura 14). Esta observación subraya la compatibilidad del R1234yf, un refrigerante que también se

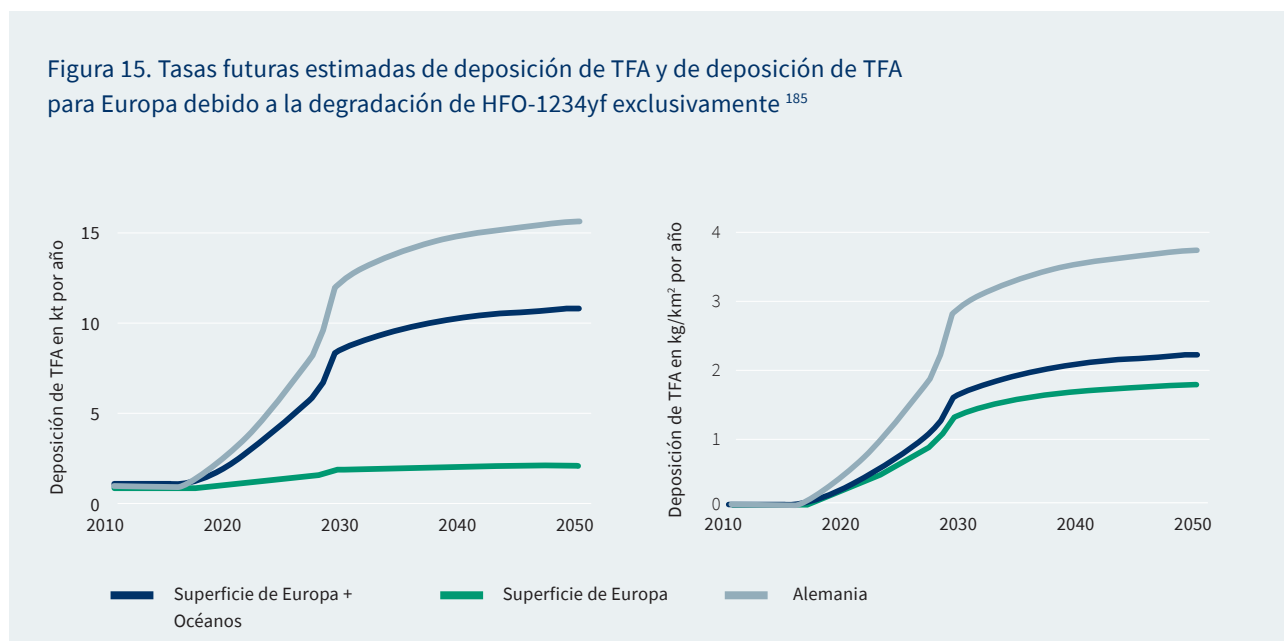
181 Mueller, R. y Schlosser, K. E. (2020). Historia y uso de sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas (PFAS) que se encuentran en el medio ambiente. Consultado el 25 de junio de 2024, de *Historia y uso de sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas (PFAS) encontradas en el medio ambiente* (itrweb.org)

182 Umweltbundesamt (Agencia Alemana para el Medio Ambiente) (2021). Reducción de la entrada de productos químicos en las aguas: trifluoroacetato (TFA) como sustancia persistente y móvil con muchas fuentes (ISSN 2363-829X). *Background 11/2021: Reducción de la entrada de productos químicos en las aguas: trifluoroacetato (TFA) como sustancia persistente y móvil con muchas fuentes* (umweltbundesamt.de)

183 Azul: TFA del refrigerante R-134a; naranja: TFA del refrigerante R-1234yf; gris: TFA de otros refrigerantes.

## 8 Escenario detallado de mitigación de emisiones

Figura 15. Tasas futuras estimadas de deposición de TFA y de deposición de TFA para Europa debido a la degradación de HFO-1234yf exclusivamente <sup>185</sup>



puede utilizar en unidades de refrigeración, con un alto contenido de TFA. Sin embargo, cabe destacar que esta sustancia sufre una descomposición completa cuando se expone al aire, el agua o el suelo.

Si bien las fuentes naturales como los respiraderos hidrotermales contribuyen a las emisiones globales de TFA, actualmente no se dispone de datos regionales para Alemania y Europa, lo que deja solo estimaciones globales. Las dos fuentes principales de TFA son R134a (segmento inferior) seguido de R1234yf (segmento superior). La cantidad más pequeña es TFA de diferentes fuentes. En el campo de la refrigeración, cada vez se presta más atención a las alternativas sostenibles desde el punto de vista ambiental a los refrigerantes convencionales. Esto incluye la exploración de refrigerantes naturales para sistemas de aire acondicionado móviles. <sup>184</sup>

La Agencia Federal de Medio Ambiente de Alemania ha pronosticado un aumento de la presencia de TFA en la atmósfera en toda Europa para 2050. Esta proyección es atribuible al uso industrial de R1234yf en MAC (Figura 15).

La evidencia sugiere la existencia de otros refrigerantes, que comprenden mezclas de R1234yf o R404A con una participación de mercado del 4% y R452A con una participación de mercado aún más insignificante del 0,1%. Además del refrigerante R134a de alto GWP, que tiene una participación de mercado del 96%, también es un componente de TFA en la medida del 20%. Esto subraya la importancia de que la industria marina acelere la identificación de un refrigerante alternativo adecuado. <sup>186, 187</sup>

<sup>184</sup> Behringer, D., et al. (2021). Productos de degradación persistentes de refrigerantes halogenados y agentes espumantes en el medio ambiente: tipo, concentraciones ambientales y destino, con especial atención a los nuevos sustitutos halogenados con bajo potencial de calentamiento atmosférico (ISSN 1862-4804). Agencia Alemana para el Medio Ambiente.

<sup>185</sup> Ibid.

<sup>186</sup> Umweltbundesamt (Agencia Alemana para el Medio Ambiente). (German Environment Agency). *Background 11/2021: Reducción de la entrada de productos químicos en las aguas: trifluoroacetato (TFA) como sustancia persistente y móvil con muchas fuentes (umweltbundesamt.de)*

<sup>187</sup> Organización Meteorológica Mundial (OMM). Evaluación científica del agotamiento de la capa de ozono: 2022.

## 8 Escenario detallado de mitigación de emisiones

Figura 16. Ilustración de la exploración del escenario para la proyección de las emisiones de TFA



Como se demuestra en la Tabla 3, cada mezcla de refrigerante con R1234yf tiene “productos químicos eternos” como subproducto. Para los análisis de TFA, se analizan las emisiones directas de la fórmula TEWI y las equivalencias. La degradación de refrigerantes a TFA se ha considerado lo más conservadora posible, es decir, R134a y R1234yf pueden degradarse hasta un 20% y un 100% a TFA, respectivamente. El desglose de R1234yf es una suposición conservadora, ya que los estudios han demostrado que este porcentaje puede alcanzar el 29-36%.<sup>188, 189</sup>

Los escenarios propuestos en este documento exploran solo los aspectos relacionados con las emisiones directas, es decir, la fase del refrigerante y la adopción de R290, lo que da como resultado nueve escenarios, como se ilustra en la Figura 16 y se detalla en la Tabla 21.

<sup>188</sup> Umweltbundesamt (Agencia Alemana para el Medio Ambiente). (German Environment Agency). *Background 11/2021: Reducción de la entrada de productos químicos en las aguas: trifluoroacetato (TFA) como sustancia persistente y móvil con muchas fuentes (umweltbundesamt.de)*

<sup>189</sup> Organización Meteorológica Mundial (OMM). Evaluación científica del agotamiento de la capa de ozono: 2022.

## 8 Escenario detallado de mitigación de emisiones

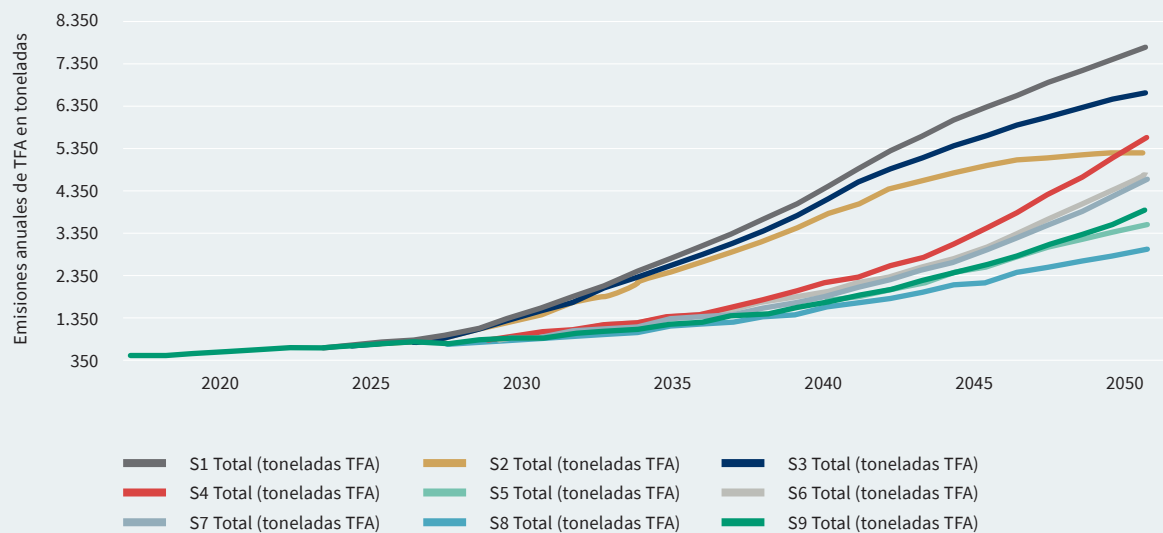
Tabla 21. Designación de escenarios para la proyección de emisiones de TFA

<b>S1</b>	Gases fluorados de la UE / Sin adopción	<b>S4</b>	Programa de Kigali / sin adopción	<b>S7</b>	Sin cumplimiento / Sin adopción
<b>S2</b>	Gases fluorados de la UE / R290 Adopción rápida	<b>S5</b>	Programa de Kigali / R290 Adopción rápida	<b>S8</b>	Sin cumplimiento / R290 Adopción rápida
<b>S3</b>	Gases fluorados de la UE / R290 Adopción lenta	<b>S6</b>	Programa de Kigali / R290 Adopción lenta	<b>S9</b>	Sin cumplimiento / R290 Adopción lenta

Las proyecciones muestran que hay un aumento en las emisiones de TFA en todos los escenarios, ya que se asume la penetración en el mercado de R1234yf en los diferentes escenarios. El análisis indica que el Reglamento de gases fluorados de la UE ejerce una influencia sustancial en la selección de refrigerantes y tiene el potencial de dar lugar a una adopción más amplia del R1234yf en los equipos de refrigeración como solución a

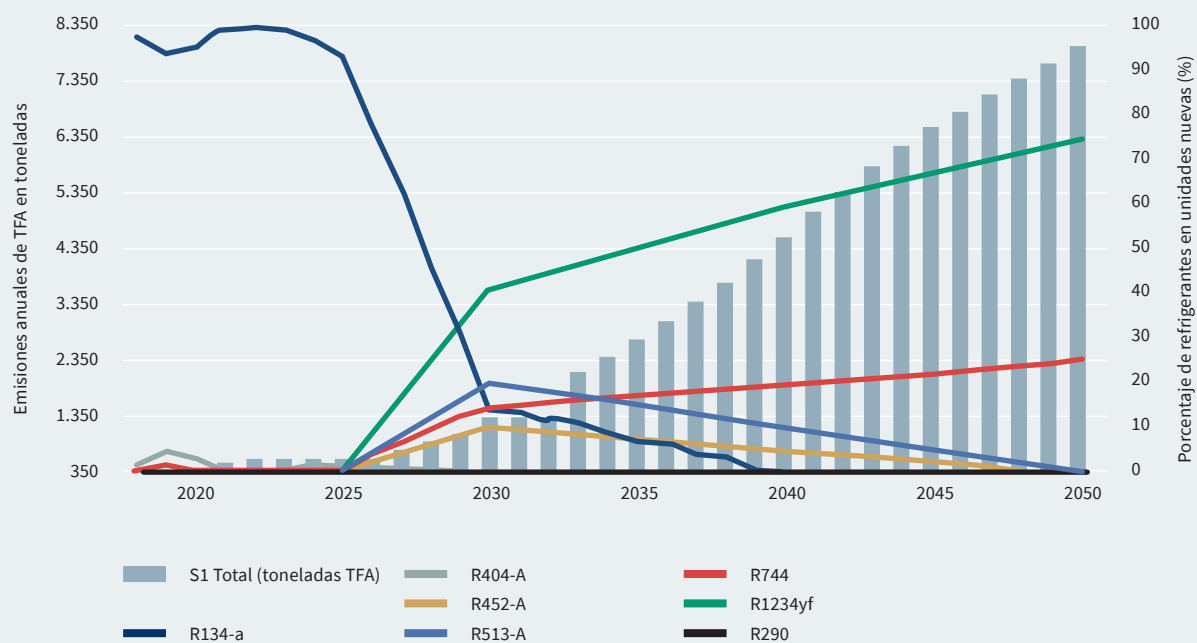
medio plazo. Sin embargo, el R1234yf también aumentará significativamente el TFA debido a su bajo GWP como refrigerante y si un contenedor refrigerado R290 no está listo para el mercado (Escenario 1). La introducción más rápida de los contenedores refrigerados R290 tendría el impacto más significativo en la reducción de TFA sin cambiar o permitir R1234yf (Escenario 8).

Figura 17. Ilustración de la exploración del escenario para la proyección de las emisiones de TFA



## 8 Escenario detallado de mitigación de emisiones

Figura 18. Proporción de refrigerante en las nuevas unidades y la correspondiente proyección de emisiones de TFA para el escenario 1 (gases fluorados de la UE / Sin adopción)



La eliminación gradual del R134a tendrá un efecto beneficioso en los esfuerzos de protección del clima de la industria naviera y los países, como se ha observado con otros refrigerantes de alto GWP como el R513A. Sin embargo, con el Reglamento de gases fluorados de la UE en vigor, es probable que los clientes prefieran los contenedores refrigerados R744 como alternativa natural sin GWP ni TFA. Sin embargo, debido a su mayor consumo de energía, no se espera que esta tecnología domine el mercado en un futuro próximo. A falta de promoción y desarrollo de alternativas de refrigerantes naturales como el CO<sub>2</sub> o el R290, el sector puede verse obligado a

enfrentarse a un dilema injustificado, caracterizado por la generación de TFA con el fin de reducir las emisiones de GEI, un tema de especial preocupación dentro de la agenda ambiental mundial. El sector de los contenedores refrigerados está preparado para enfrentar numerosos desafíos en los próximos años, y la transición a los contenedores refrigerados R290 tiene el potencial de abordar dos problemas importantes: el R290 no tiene GWP ni propensión a formar TFA, lo que lo convierte en una tecnología crucial para explorar en un futuro cercano con el fin de garantizar un futuro sostenible y respetuoso con el ambiente.

## 8 Escenario detallado de mitigación de emisiones

### 8.3.3 Análisis de sensibilidad

Esta sección presenta un análisis de sensibilidad y su papel en la evaluación del impacto potencial de varios factores de entrada en las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub>eq) para 2050, específicamente en el contexto del cálculo del potencial de mitigación. Los cálculos fueron realizados por un equipo de la Universidad de Wageningen, dirigido por Josianne Cloutier y Leo Lukasse, con el apoyo de GIZ. El objetivo general era evaluar cómo los diferentes escenarios y factores de entrada influyen en el potencial de reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>eq.

El análisis de sensibilidad consideró una variedad de escenarios que involucran diferentes marcos regulatorios, como el Reglamento de gases fluorados de la UE, la Enmienda de Kigali y un escenario sin un programa regulatorio específico. Este análisis también tuvo en cuenta el papel de los objetivos de reducción de la intensidad de emisiones de la OMI, así como los diversos avances tecnológicos, incluida la posible adopción de refrigerantes R290 como gas refrigerante. Estos escenarios ayudaron a identificar cómo las diferentes políticas y cambios tecnológicos podrían influir en las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Para realizar el análisis de sensibilidad, se modelaron varias combinaciones de marcos regulatorios, avances tecnológicos y condiciones del mercado. Los factores de entrada clave probados incluyeron carga de refrigerante (medida en kilogramos), tasas de fuga (porcentaje de refrigerante perdido anualmente), tasas de recuperación (porcentaje de refrigerantes recuperados), demanda de energía por unidad (kW) y mejoras de eficiencia a lo largo del tiempo. Además, la introducción de refrigerantes alternativos, como el R290, se evaluó en tres condiciones diferentes: sin introducción, introducción gradual y una introducción rápida.

Al comparar los resultados en los escenarios, el análisis de sensibilidad destacó qué factores tienen el mayor impacto en el potencial de reducción de emisiones.

Los hallazgos ayudan a identificar áreas de enfoque clave para los responsables políticos y las partes interesadas de la industria que buscan maximizar la mitigación de las emisiones de CO<sub>2</sub>eq a través de medidas regulatorias y tecnológicas específicas.

El análisis de sensibilidad incluyó una amplia gama de variaciones en los factores de entrada clave para explorar los impactos potenciales en las emisiones de CO<sub>2</sub>. La Figura 19 a continuación proporciona una descripción detallada de los cambios de entrada considerados en el análisis:

Tabla 22. Resumen de los cambios de entrada

Entrada	Unidad	Rango	Referencia
Carga	Kg	3	5
		8	
Tasa de fuga	%	2	15
		20	
Tasa de recuperación	%	30	60
		98	
Factor de crecimiento	%	6	8
Demanda de Energía demanda por unidad (potencia base)	Kw	1,5	2,5
		4	
Alta ganancia de eficiencia R290	%	15	20
		30	

Cada entrada se varió para explorar una amplia gama de resultados posibles, utilizando valores bajos y altos para los factores clave. Por ejemplo, la demanda de energía se probó con valores que oscilaron entre 1,5 kW y 4 kW, mientras que la tasa de fugas osciló entre el 5% y el 20%.

La carga de refrigerante se fijó entre 3 kg y 8 kg, y se evaluaron tasas de recuperación del 30% al 98%. También se probaron factores de crecimiento entre el 6% y el 10%. Mediante la modelización de 30 escena-

## 8 Escenario detallado de mitigación de emisiones

rios distintos, el análisis tenía como objetivo capturar la sensibilidad de las emisiones a los cambios en estas variables.

El resultado de cada escenario se comparó con un caso de referencia para resaltar el impacto relativo de cada insumo. Este enfoque permitió identificar los impulsores más importantes de las emisiones de CO<sub>2</sub>eq y proporcionó información sobre el potencial de reducción de emisiones bajo diferentes vías regulatorias y tecnológicas.

El análisis de sensibilidad reveló varios factores críticos que influyen en las futuras emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub>, y algunas entradas tienen un efecto mucho más pronunciado que otras. El factor más significativo fue la demanda de energía por unidad, que tuvo el mayor impacto en las emisiones. En escenarios donde la demanda de energía era alta (4 kW), las emisiones se dispararon a 58,54 millones de toneladas (Mt) de CO<sub>2</sub>eq para 2050. En cambio, cuando la demanda de energía se redujo a 1,5 kW, las emisiones fueron mucho menores, con 28,23 Mt de CO<sub>2</sub>eq. Esto subraya el papel central de la eficiencia energética en la configuración de futuras vías de emisiones.

La tasa de fugas y la carga de refrigerante también surgieron como los principales impulsores de las emisiones, particularmente en escenarios regidos por la Enmienda de Kigali o donde no se siguió un cronograma regulatorio. Cuando la tasa de fugas era alta (20%) y la carga de refrigerante por unidad aumentaba a 8 kg, las emisiones aumentaban drásticamente. En algunos casos, la diferencia entre escenarios de fugas y cargas altas y bajas llevó a una variación de hasta 21,44 Mt CO<sub>2</sub>eq, lo que subraya la importancia de reducir las fugas y optimizar la gestión del refrigerante.

La tasa de recuperación de refrigerantes, que oscila entre el 30% y el 98%, también jugó un papel importante, aunque en menor medida que la demanda de energía.

Las tasas de recuperación más altas ayudaron a reducir las emisiones, con una diferencia potencial de hasta 17,0 Mt de emisiones de CO<sub>2</sub> en diferentes escenarios. Esta variación de 17,0 Mt refleja el impacto que puede tener una recuperación efectiva para minimizar la liberación de refrigerantes durante la fase de eliminación o reciclaje. Por lo tanto, mejorar la recuperación de refrigerantes, especialmente al final del ciclo de vida de un producto, puede contribuir significativamente a reducir las emisiones generales de gases de efecto invernadero.

En lo que respecta a la introducción de refrigerantes R290, el análisis encontró que su impacto en las emisiones era relativamente pequeño. Aunque el R290 ofrece mejoras de eficiencia, su contribución general a la reducción de emisiones fue limitada en el contexto más amplio de los escenarios probados. Esto contrasta con las emisiones de PFAS, en las que el R290 juega un papel crucial para evitar los “productos químicos eternos” como subproductos de los refrigerantes refrigerados, como el R134a y el R1234yf.

**Estos hallazgos resaltan la importancia crítica de gestionar tanto la demanda de energía como las tasas de crecimiento para los responsables políticos y las partes interesadas de la industria que buscan reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>eq para 2050.**

El análisis demuestra además que la tasa de fugas, la carga de refrigerante y la eficiencia de recuperación también tienen efectos significativos, especialmente en escenarios en los que no se siguen los cronogramas regulatorios. Sin embargo, las ganancias de eficiencia de los refrigerantes R290 parecen tener un impacto limitado en las emisiones generales. Para lograr reducciones significativas en las emisiones de CO<sub>2</sub>eq para 2050, los responsables políticos y las partes interesadas de la industria deben priorizar las medidas de eficiencia energética, reducir el consumo de energía de los contenedores refrigerados y garantizar un estricto cumplimiento normativo.



## CLIMATE CENTER

by Kühne Foundation

Kuehne Climate Center  
Grosser Grasbrook 17  
20457 Hamburgo  
Alemania  
Correo-E: [climate@kuehne-foundation.org](mailto:climate@kuehne-foundation.org)  
[Kuehne Climate Center](#)