

Calentamiento global y refrigerantes: realidad y futuro

Global warming and refrigerants: reality and future

Vicente Pérez-García

Universidad de Guanajuato, México

v.perez@ugto.mx

 <https://orcid.org/0000-0002-2522-3812>

Recepción: 23 de agosto de 2023

Aprobación: 2 de julio de 2024



Dario Méndez-Méndez*

Universidad de Guanajuato, México

d.mendez.mendez@ugto.mx

 <https://orcid.org/0000-0002-8394-890X>

RESUMEN

Se presenta un panorama de la influencia de refrigerantes con bajo potencial de calentamiento global comparados al R134a según el impacto total equivalente de calentamiento (TEWI) y el rendimiento climático durante el ciclo de vida (LCCP). Ambos parámetros son analizados para los refrigerantes R513A, R1234ze(E) y R516A. Las pruebas se realizaron en una instalación de refrigeración experimental a una temperatura de evaporación de 0 °C y dos temperaturas de condensación, 35 °C y 45 °C. Para una temperatura de 45 °C, los refrigerantes R1234ze(E) y R516A reducen las emisiones de CO₂-eq en un 16.0% y 11.6%, según el TEWI. En términos del LCCP, los refrigerantes R513A, R516A y R1234ze(E) evitan la emisión de 1 212, 2 204 y 2 669 kg CO₂-eq respectivamente.

PALABRAS CLAVE: calentamiento global, refrigerantes de bajo GWP, refrigeración, aire acondicionado, reemplazo del R134a.

ABSTRACT

This work presents an overview of the influence of refrigerants with low global warming potential compared to R134a according to the total equivalent warming impact (TEWI) and life cycle climate performance (LCCP). Both parameters are analyzed for refrigerants R513A, R1234ze(E) and R516A. The tests were conducted in an experimental refrigeration installation at an evaporating temperature of 0 °C and two condensing temperatures, 35 °C and 45 °C. For a temperature of 45 °C, refrigerants R1234ze(E) and R516A reduce CO₂-eq emissions by 16.0% and 11.6%, according to TEWI. Regarding LCCP, refrigerants R513A, R516A, and R1234ze(E) avoid the emission of 1212, 2204, and 2669 kg CO₂-eq, respectively.

KEYWORDS: global warming, Low-GWP refrigerants, refrigeration, air conditioning, R134a replacement.

INTRODUCCIÓN

El uso de sistemas de refrigeración y aire acondicionado forma parte de las necesidades comunes de todas las personas del mundo. Aparatos como congeladores, refrigeradores domésticos y máquinas dispensadoras de productos refrigerados permiten almacenar productos a temperaturas adecuadas para alargar su tiempo de vida y mantenerlos en condiciones adecuadas para el consumo. También, sistemas de aire acondicionado (doméstico, comercial y automotriz) ofrecen un mayor confort en diferentes ambientes. Estos equipos en su gran mayoría operan bajo un ciclo de refrigeración por compresión de vapor, ciclo compuesto por cuatro elementos principales: un compresor, un condensador, un dispositivo de expansión y un evaporador. La figura 1 señala estos componentes en el esquema de un refrigerador doméstico.

*AUTOR PARA CORRESPONDENCIA

d.mendez.mendez@ugto.mx

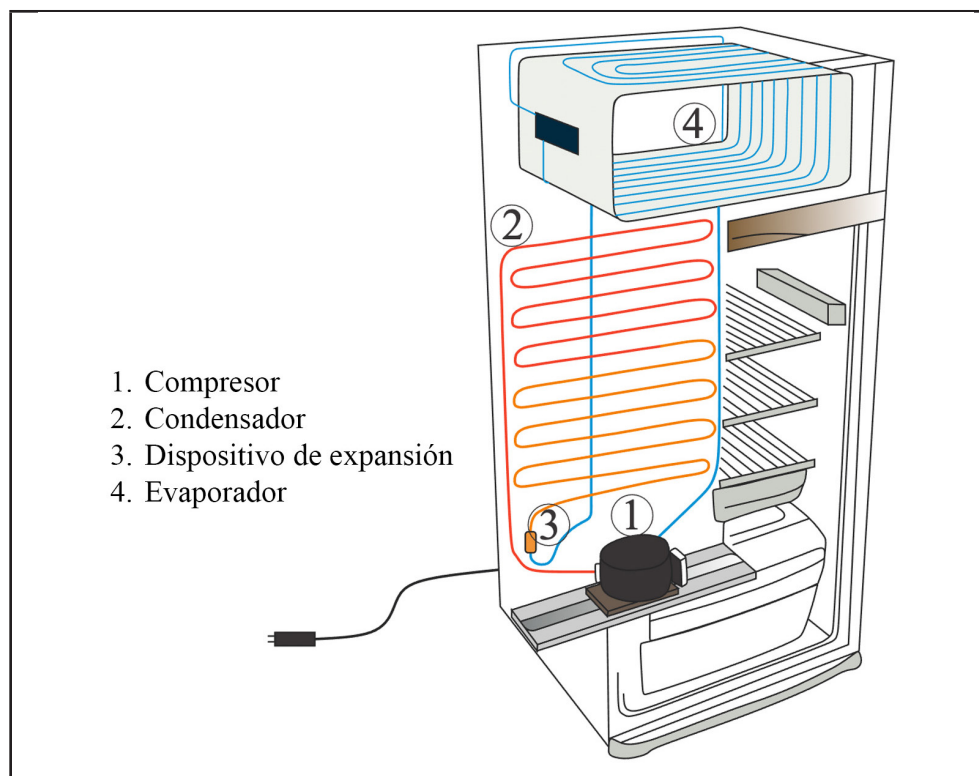


FIGURA 1
Componentes de un sistema de refrigeración
Fuente: elaboración propia.

El número de equipos de refrigeración y aire acondicionado que funcionan en la actualidad ha visto un aumento alarmante (figura 2); esta situación evidencia que la demanda de energía eléctrica de dichos equipos alcanza hasta un 20% de la disponible a nivel mundial (IIR, 2017), lo que representa una gran cantidad de emisiones de CO₂-eq al ambiente. De esta manera, el sector de la refrigeración es responsable del 7.8% de las emisiones de gases de efecto invernadero, siendo el 63% de estas emisiones causadas por el consumo de energía eléctrica y un 37% por el escape hacia la atmósfera de los refrigerantes que se emplean hoy en día (IIR, 2019).

Es importante comentar sobre el índice GWP (Potencial de Calentamiento Global), que fue implementado en 1990 y hace referencia al impacto de manera directa que tienen los gases de efecto invernadero en el medioambiente medio ambiente cuando son liberados a la atmósfera. En el caso de los refrigerantes esa exposición se debe a fugas de gas durante la operación de los equipos o durante los procesos de carga y recuperación de refrigerante. En líneas generales, el GWP cuantifica el potencial de calentamiento de un determinado gas comparado con el que presenta el mismo volumen de CO₂-eq; a este último se le asignó un GWP de 1 (Azar y Johansson, 2012). Los refrigerantes que se han venido empleando durante las últimas décadas se caracterizan por un alto GWP y se dividen principalmente en dos grupos: hidroclorofluorocarbonos (HCFCs) e hidrofluorocarbonos (HFCs). El refrigerante R134a hace parte de los HFCs y cuenta con un GWP de 1430, por lo cual participa de manera decisiva en el cambio climático y calentamiento global que nos aqueja en la actualidad. Además, integra los fluidos conocidos como gases de efecto invernadero y está en la mira de tratados internacionales como el Protocolo de Kioto, Acuerdo de París y la Enmienda de Kigali.

1. CALENTAMIENTO GLOBAL: REALIDAD

Debido al uso de refrigerantes HFC en los sistemas de refrigeración, se estima que para 2050 representaría entre el 9% y el 19% de las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial (Miranda *et al.*, 2023). Los riesgos

de no tomar en cuenta con una mayor responsabilidad el calentamiento global están relacionados con un aumento en la temperatura de la tierra cercano a los 4°C para finales de 2100, es decir, habrá ciudades en el mundo donde las temperaturas en épocas de verano superen los 50°C (Purohit *et al.*, 2022). Estas altas temperaturas producen un ambiente carente de confort para la vida cotidiana y, peor aún, traen consigo consecuencias severas e irreparables en diferentes ecosistemas del planeta, que afectan de gran manera los recursos hídricos, la fauna, la flora, la salud, entre otros. (figura 3). Por lo tanto, es necesario que mediante compromisos, objetivos y políticas más contundentes las emisiones de gases de efecto invernadero mundiales comiencen a disminuir hasta reducirse en un 50% para 2050 (Wang *et al.*, 2022).



FIGURA 2

Aumento en la instalación de aires acondicionados

Fuente: Martín León Francisco, 2022.



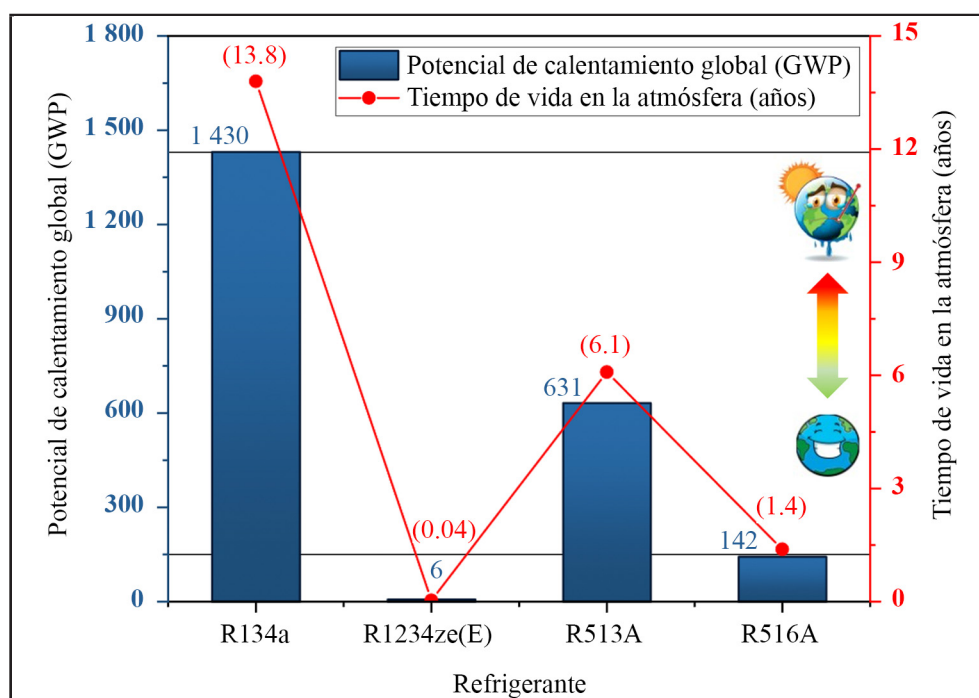
FIGURA 3

Efectos del calentamiento global en el medioambiente

Fuente: Oscar Mendiola, 2017.

2. REFRIGERANTES ALTERNATIVOS: FUTURO

En sistemas de refrigeración, según las nuevas regulaciones, el uso de refrigerantes debe atender la restricción de un GWP < 150, tal como lo indica la enmienda de Kigali (EPA, 2016) ratificada por México, y la más reciente actualización de la normativa Europea, F-Gas de 2024 (EUR-Lex, 2024). Actualmente, se encuentran en investigación nuevas sustancias que ayuden a disminuir el calentamiento global. En este sentido, destaca la mezcla refrigerante R513A con la siguiente composición (44% R134a, 56%R1234yf), la cual está pensada como sustituto en el corto plazo y que ayudaría en la transición hacia refrigerantes con un GWP más bajo, así como también el refrigerante puro R1234ze(E) y la mezcla refrigerante de reciente creación el R516A (77.5% R1234yf, 14% R152a, 8.5%R134a), ambos con un GWP < 150. Estas sustancias se plantean como alternativas en el corto, mediano y largo plazo, ya que son pueden contribuir a los objetivos de reemplazo de los HFCs. Asimismo, el tiempo de vida en la atmósfera de estas nuevas opciones es muy bajo, el cual es un factor relevante porque significa la cantidad de tiempo que este gas, una vez expulsado al ambiente, dura en la atmósfera absorbiendo calor e incrementando la temperatura del planeta. En la gráfica 1 se observa una escala del tiempo de vida en la atmósfera de los refrigerantes mencionados. Con esto es sencillo identificar la capacidad de calentamiento global que tienen cada uno de estos fluidos.



GRÁFICA 1
GWP y tiempo de vida en la atmósfera de algunos refrigerantes
Fuente: elaboración propia.

Por lo anterior, cuando se emplean estos refrigerantes en los sistemas de refrigeración, es muy importante evaluar el impacto en el ambiente que representa su uso en un sistema de refrigeración. Hay dos indicadores que miden el impacto total que tienen los refrigerantes en el calentamiento global: el Impacto Total Equivalente de Calentamiento (TEWI) y el Rendimiento Climático durante el Ciclo de Vida (LCPP).

El índice TEWI es la métrica más generalizada para calcular el impacto ambiental de un sistema de refrigeración desde su uso hasta su eliminación (UNIDO, 2009). Básicamente, se refiere a la cantidad de emisiones de

CO₂-eq al ambiente, además de considerar las emisiones directas debido a la fuga de refrigerante y las emisiones indirectas que tienen que ver con el consumo de energía eléctrica de los equipos de refrigeración (figura 4). El TEWI suele expresarse en kilogramos de CO₂-eq expulsados al ambiente.

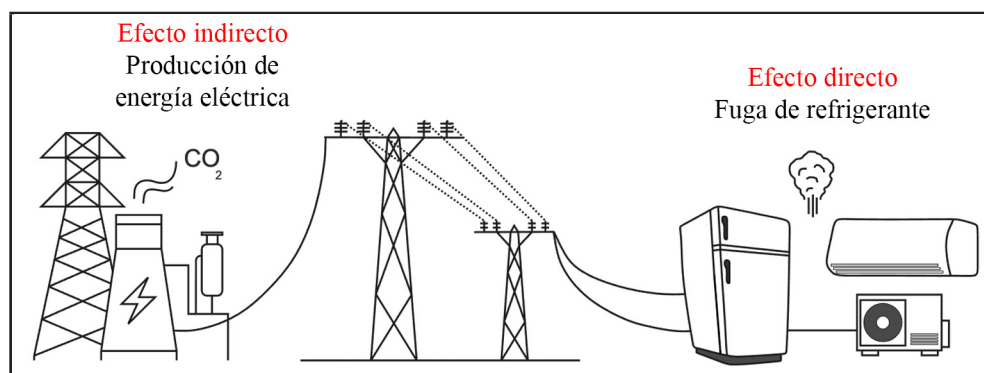


FIGURA 4
Emisiones directas e indirectas según el TEWI
Fuente: elaboración propia.

El TEWI se determina mediante la ecuación 1, donde las emisiones directas (ED_{TEWI}) se evalúan con la ecuación 2, y las emisiones indirectas (EI_{TEWI}) se calculan con la ecuación 3.

$$TEWI = ED_{TEWI} + EI_{TEWI} \quad (1)$$

$$ED_{TEWI} = GWP \cdot M \cdot L \cdot ALR + (1 - \alpha_{recup}) \cdot GWP \cdot M \quad (2)$$

$$EI_{TEWI} = L \cdot AEC \cdot EM \quad (3)$$

Respecto a las emisiones directas, éstas dependen de la carga de refrigerante (M), la vida útil en años del equipo de refrigeración (L), el porcentaje de fugas anual de refrigerante (ALR), un factor de recuperación que varía de 0 a 1 y que representa el porcentaje de refrigerante recuperado al final de la vida útil del sistema (α), y, por último, el potencial de calentamiento global (GWP) propio del refrigerante usado. En el caso de las emisiones indirectas se incluyen dos parámetros adicionales: AEC significa el consumo anual de energía (kWh/año) y EM corresponde a las emisiones indirectas (kg CO₂-eq/kWh) debido a la producción de electricidad para el caso de México, corresponde a un valor de 0.423 kg CO₂-eq/kWh (CRE, 2023).

Por su parte, el LCCP cuantifica el impacto del refrigerante en el ambiente de manera más detallada que el TEWI, además de estar relacionado con la repercusión ambiental que implica el uso de los sistemas de refrigeración durante toda su vida útil. Este indicador tiene en cuenta las emisiones directas propias del refrigerante y emisiones indirectas relacionadas al consumo de energía eléctrica, factores de manufactura de los refrigerantes y del equipo de refrigeración usado (figura 5).

La metodología para determinar el LCCP fue investigada de la literatura disponible (Wan *et al.*, 2021). Al igual que el TEWI, el LCCP se mide en kg CO₂-eq y es la suma de las emisiones directas (EI_{LCCP}) e indirectas (EI_{LCCP}) que ocurren durante el funcionamiento de un sistema de refrigeración. Para su cálculo, se emplea la ecuación 4.

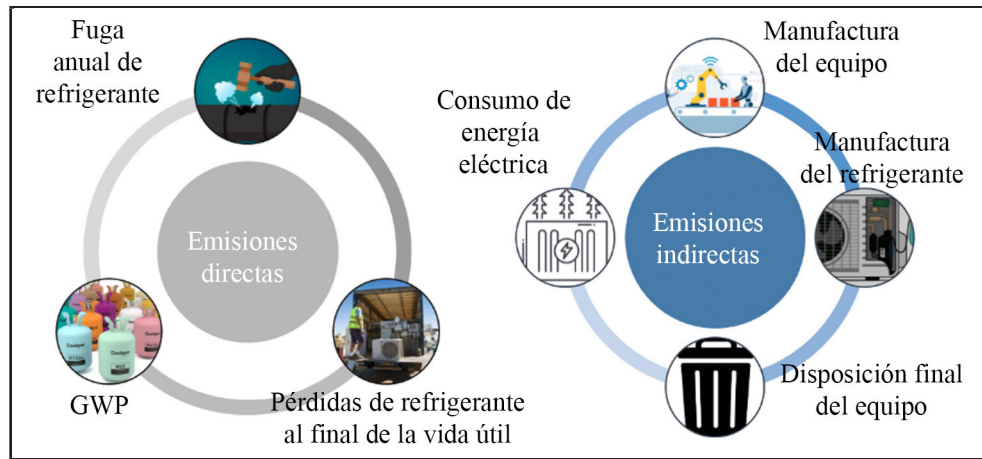


FIGURA 5
Emisiones directas e indirectas según el LCCP
Fuente: elaboración propia.

$$LCCP = ED_{LCCP} + EI_{LCCP} \quad (4)$$

En este caso, las emisiones directas se evalúan con la ecuación (5). Algunos términos ya se han definido en el análisis del TEWI. Aquí, EOL es la fuga de refrigerante al final de la vida útil (% de la carga de refrigerante) y adp . GWP significa el GWP de los productos de degradación atmosférica del refrigerante (kg CO₂-eq/kg).

$$ED_{LCCP} = M \cdot (L \cdot ALR + EOL) \cdot (GWP + adp \cdot GWP) \quad (5)$$

Las emisiones indirectas se calculan con la ecuación (6), consisten en la suma de emisiones correspondientes al consumo de energía, manufactura del equipo, manufactura del refrigerante y disposición final del equipo y del refrigerante.

$$EI_{LCCP} = EI_{energía} + EI_{manuf,sist} + EI_{EOL,sist} + EI_{manuf,ref} + EI_{EOL,ref} \quad (6)$$

Las emisiones correspondientes al consumo de energía se determinan con la ecuación (7), donde los factores se describieron anteriormente.

$$EI_{energía} = L \cdot AEC \cdot EM \quad (7)$$

De igual forma, para determinar las magnitudes de emisiones indirectas de CO₂-eq teniendo en cuenta la manufactura y disposición final del equipo y del refrigerante, se emplean las ecuaciones (8)-(11).

$$EI_{manuf,sist} = \sum (MM \cdot m) \quad (8)$$

$$EI_{EOL,sist} = \sum (RM \cdot Mr) \quad (9)$$

$$EI_{manuf,ref} = M \cdot (1 + L \cdot ALR) \cdot (1 - \alpha) \cdot RFM \quad (10)$$

$$EI_{EOL,ref} = M \cdot (1 - EOL) \cdot RFD \quad (11)$$

Donde, MM es la cantidad de $\text{CO}_2\text{-eq}$ producido por kg de material manufacturado, m es el peso de cada material manufacturado que hace parte del sistema analizado, RM refiere al $\text{CO}_2\text{-eq}$ producido por kg de material reciclado, Mr significa la masa de material reciclado, RFM son las emisiones de $\text{CO}_2\text{-eq}$ por kg de la fabricación de refrigerante, α define la fracción de refrigerante recuperado y RFD determina las emisiones de $\text{CO}_2\text{-eq}$ durante la recuperación y disposición final del refrigerante.

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En el laboratorio de termofluidos de la Universidad de Guanajuato se cuenta con una instalación experimental de refrigeración que funciona mediante un ciclo de compresión de vapor, con una capacidad de refrigeración nominal de 3.5 kW. En la figura 6 se visualizan los componentes principales. El compresor es de tipo hermético/reciprocante, el evaporador y el condensador son intercambiadores de calor de placas soldadas y, por último, el dispositivo de expansión es una válvula de expansión electrónica. Los ensayos se llevan a cabo considerando una temperatura de evaporación de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ que simule aplicaciones de refrigeración y aire acondicionado. Además, se prueban dos temperaturas de condensación, una temperatura de $35\text{ }^{\circ}\text{C}$, presente en regiones del mundo donde la temperatura media del ambiente se encuentra en un rango de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, y una temperatura de $45\text{ }^{\circ}\text{C}$, presente en climas cálidos con temperatura media del ambiente entre $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Bitzer, 2023; SEMARNAT, 2018; Torres Gomez, 2011). En cuanto a las pruebas, éstas se realizan para cada uno de los refrigerantes alternativos y se comparan los resultados teniendo como base el impacto ambiental que representa el R134a.

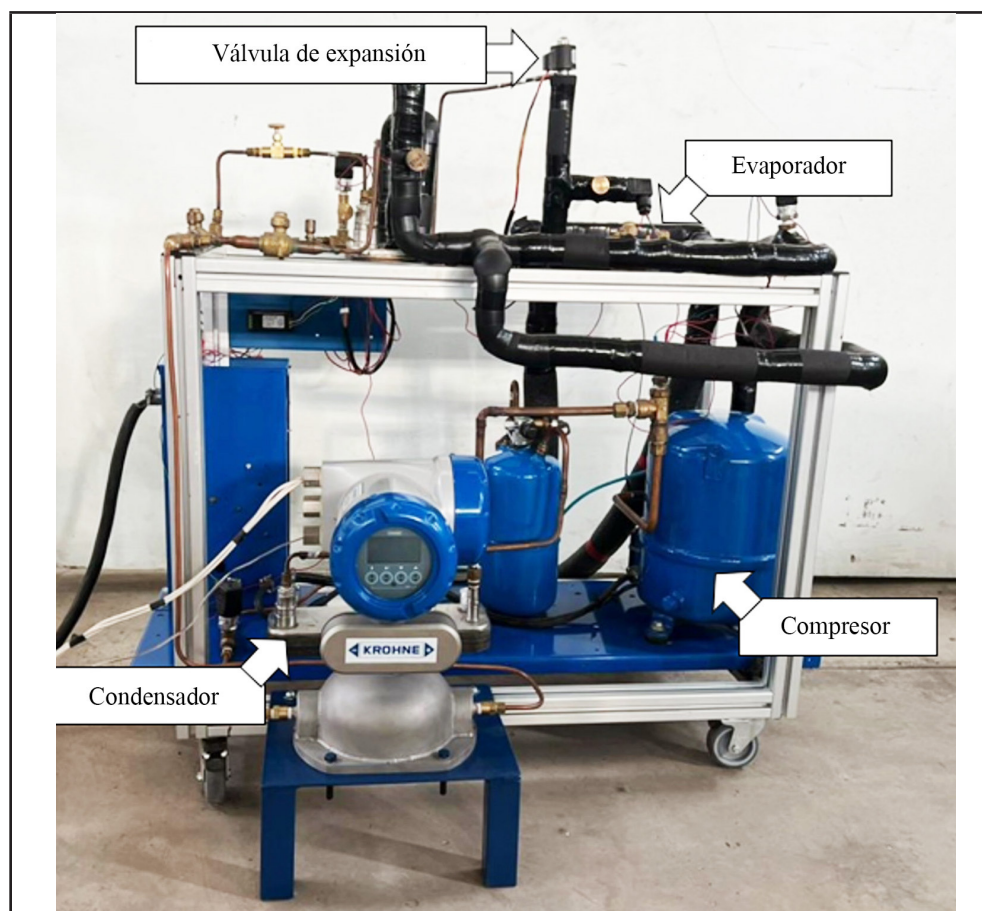


FIGURA 6

Fotografía de la instalación de refrigeración experimental

Fuente: elaboración propia.

Para alcanzar las condiciones descritas, necesarias para la evaluación experimental de los refrigerantes considerados, la instalación de refrigeración debe operarse bajo condiciones controladas en la etapa de evaporación y condensación. Para esto, es necesario acoplar al circuito de compresión de vapor de la instalación experimental dos circuitos secundarios (Méndez-Méndez *et al.*, 2022): el primero se encarga de simular la carga térmica y se comunica con el evaporador y la función del segundo es la disipación de carga térmica, que va conectado al condensador. De manera esquemática, la figura 7 ilustra la instalación de refrigeración adaptada a los circuitos secundarios.

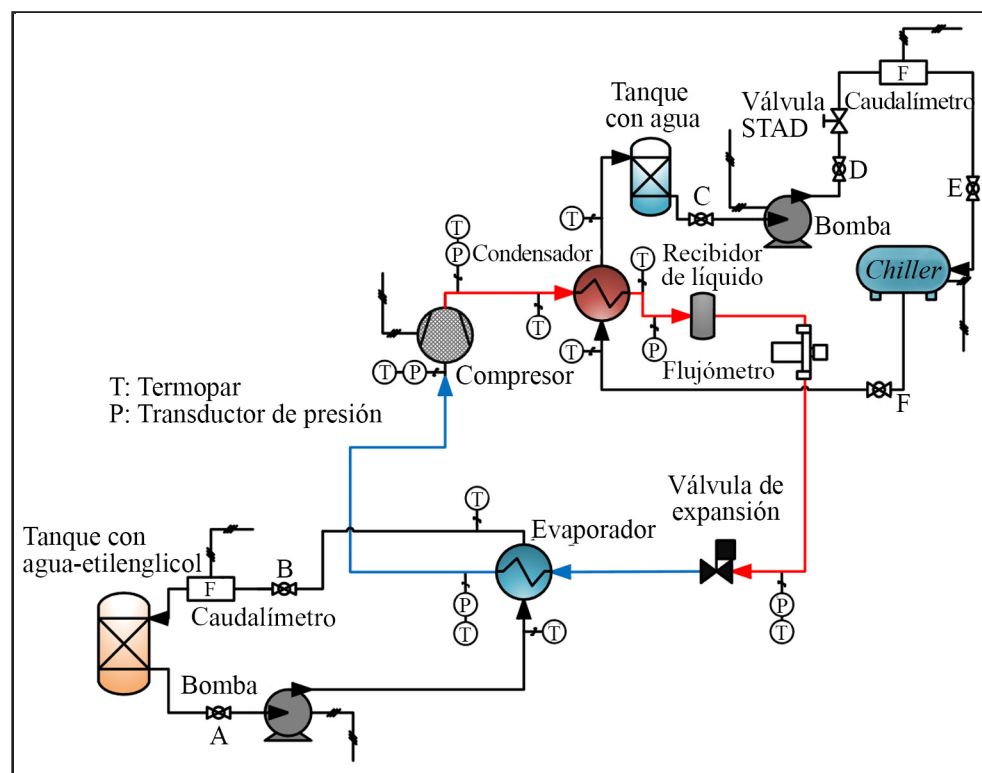


FIGURA 7
Esquema de la instalación de refrigeración experimental
Fuente: elaboración propia.

En este caso, el circuito de simulación de carga térmica, compuesto por un tanque de almacenamiento de agua-etilenglicol con una composición en volumen de 70% agua y 30% etilenglicol, una resistencia eléctrica sumergible, una bomba centrífuga acoplada con un variador de frecuencia y un caudalímetro electromagnético permiten regular la temperatura de evaporación del refrigerante. Mediante el control de la temperatura de la resistencia eléctrica sumergida en el tanque con agua-etilenglicol y la variación de rotación de la bomba, se mantienen una temperatura y un caudal aproximadamente constantes a la entrada del evaporador, y con la graduación de la apertura de la válvula de expansión electrónica de la instalación se mantiene una temperatura de evaporación del refrigerante de 0 °C. De igual forma, es necesario disipar todo el calor adquirido por el refrigerante tanto en la etapa de evaporación como en la de compresión durante el ciclo de refrigeración; para esto, se emplea agua como fluido en el circuito secundario de disipación de carga térmica compuesto principalmente por un *chiller* encargado de enfriar el agua, una bomba centrífuga, una válvula tipo STAD para regular el flujo y un caudalímetro electromagnético, con esto se puede controlar la temperatura y el caudal del agua que ingresa al condensador, la cual se encarga de absorber todo el calor del refrigerante proveniente del compresor a alta temperatura. El procedimiento para alcanzar las temperaturas deseadas consiste en el control de la temperatura del agua de entrada de 30 °C y 40 °C, que garantiza las temperaturas de condensación de 35 °C y 45 °C respectivamente.

Además, un factor sobresaliente en el análisis del TEWI y el LCCP es el consumo de la energía eléctrica, por lo que se utiliza un analizador de calidad de energía FLUKE-438 para obtener estos valores en tiempo real del sistema de refrigeración con cada uno de los refrigerantes por evaluar durante las pruebas experimentales. En este sentido, es fundamental destacar que el procedimiento de carga de refrigerante para todos los fluidos analizados en este estudio está documentado en un trabajo previo (Méndez-Méndez *et al.*, 2023), donde se buscó que para los valores de carga de refrigerante obtenidos se produjera un consumo de energía mínimo.

3. 1. Análisis del TEWI

Para el cálculo del TEWI, la vida útil de la instalación de refrigeración experimental se fijó en 15 años para cada uno de los refrigerantes. La tasa de recuperación de vida útil del refrigerante (α) se estableció en un 70%, que corresponde a equipos con una carga de refrigerante inferior a 100 kg (AIRAH, 2012). Las fugas anuales debidas al uso de la instalación se fijaron en 5%, teniendo en cuenta su funcionamiento normal por pérdidas catastróficas y por servicio y mantenimiento (IIR, 2017). El cuadro 1 muestra a detalle los factores empleados para determinar el TEWI correspondiente a cada refrigerante. En este caso, se toma como referencia la condición de 0 °C en evaporación y de 45 °C en condensación.

CUADRO 1
Factores para determinar el TEWI

Parámetro	R134a	R1234ze(E)	R513A	R516A
Emisiones directas (ED_{TEWI}), (kg CO ₂ -eq)	585.2	2.33	248.0	53.85
Carga de refrigerante (M), (kg)	0.682	0.648	0.655	0.632
Vida útil del sistema (L), (años)	15	15	15	15
Razón de fugas anual (ALR), (kg/año)	0.0341	0.0324	0.0328	0.0316
Factor de recuperación de refrigerante (α), (%)	70	70	70	70
GWP (kg CO ₂ -eq/kg)	1 430	6	631	142
Emisiones indirectas (EI_{TEWI}), (kg CO ₂ -eq)	6 550.6	5 991.7	6 525.7	6 256.7
Consumo de energía anual (AEC) (kWh/año)	1 032.4	944.3	1 028.5	986.1
Producción de energía (EM), (kg CO ₂ -eq/kWh)	0.423	0.423	0.423	0.423
$TEWI$, (kg CO ₂ -eq)	7 136	5 994	6 774	6 311

Fuente: elaboración propia.

3. 2. Análisis del LCCP

Para la determinación del LCCP es conveniente mostrar a detalle los parámetros empleados para su cálculo. Al respecto, el cuadro 2 muestra los factores empleados para determinar las emisiones directas. Cabe señalar que debido a la limitada actualización de valores correspondientes a la manufactura del refrigerante –en especial para el R516A, que es de reciente creación– se hizo una aproximación tomando en cuenta valores conocidos de los refrigerantes que lo componen.

CUADRO 2
Parámetros para determinar las emisiones directas según el LCCP

Parámetro	R134a	R1234ze(E)	R513A	R516A	Referencia
ALR (%/año)	5	5	5	5	IIR, 2017
EOL (%)	15	15	15	15	Llopis <i>et al.</i> , 2020
GWP (kg CO ₂ -eq/kg)	1430	6	631	142	Al-Sayyab <i>et al.</i> , 2022
adp.GWP (kg CO ₂ -eq/kg)	1.6	3.3	2.55	2.76	Wang y You, 2023

Fuente: elaboración propia.

Respecto a las emisiones que involucran la manufactura y la disposición final de la instalación experimental y del refrigerante, los principales parámetros empleados para evaluar su influencia en la cantidad de emisiones indirectas de CO₂-eq se indican en el cuadro 3 (Wan *et al.*, 2021). Estos factores se determinan con base en el porcentaje del tipo de material que compone la instalación experimental, cifras que corresponden a una fracción del peso total de la unidad, la cual alcanza un peso total de 130 kg.

CUADRO 3
Emisiones de CO₂-eq según la manufactura de los materiales

Material	Porcentaje de composición (%)	Cantidad de emisiones (kg CO ₂ -eq/kg)
Acero	72	1.8
Cobre	11	2.71
Aluminio	10	5.65
Plástico	7	3.31

Fuente: elaboración propia.

En el cuadro 4 se señala la cantidad de emisiones por material reciclado de la instalación experimental teniendo en cuenta la bibliografía consultada (Wang y You, 2023).

CUADRO 4
Emisiones de CO₂-eq por material reciclado

Material	Material reciclado (%)	Cantidad de emisiones (kg CO ₂ -eq/kg)
Metal	93	0.07
Plástico	7	0.01

Fuente: elaboración propia.

Las emisiones por manufactura del refrigerante están especificadas en el cuadro 5 (Wang y You, 2023). Debido a la nula información respecto a las emisiones de CO₂-eq que tienen lugar durante la disposición final de los refrigerantes analizados (*RFD*), al igual que toda la bibliografía consultada, cabe mencionar las emisiones del proceso de eliminación del refrigerante, aunque no se contabilicen.

CUADRO 5
Emisiones de CO₂-eq causadas por la manufactura del refrigerante

Refrigerante	Emisiones (RFM) (kg CO ₂ -eq/kg)
R134a	5.0
R1234ze(E)	13.7
R513A	9.87
R516A	11.74

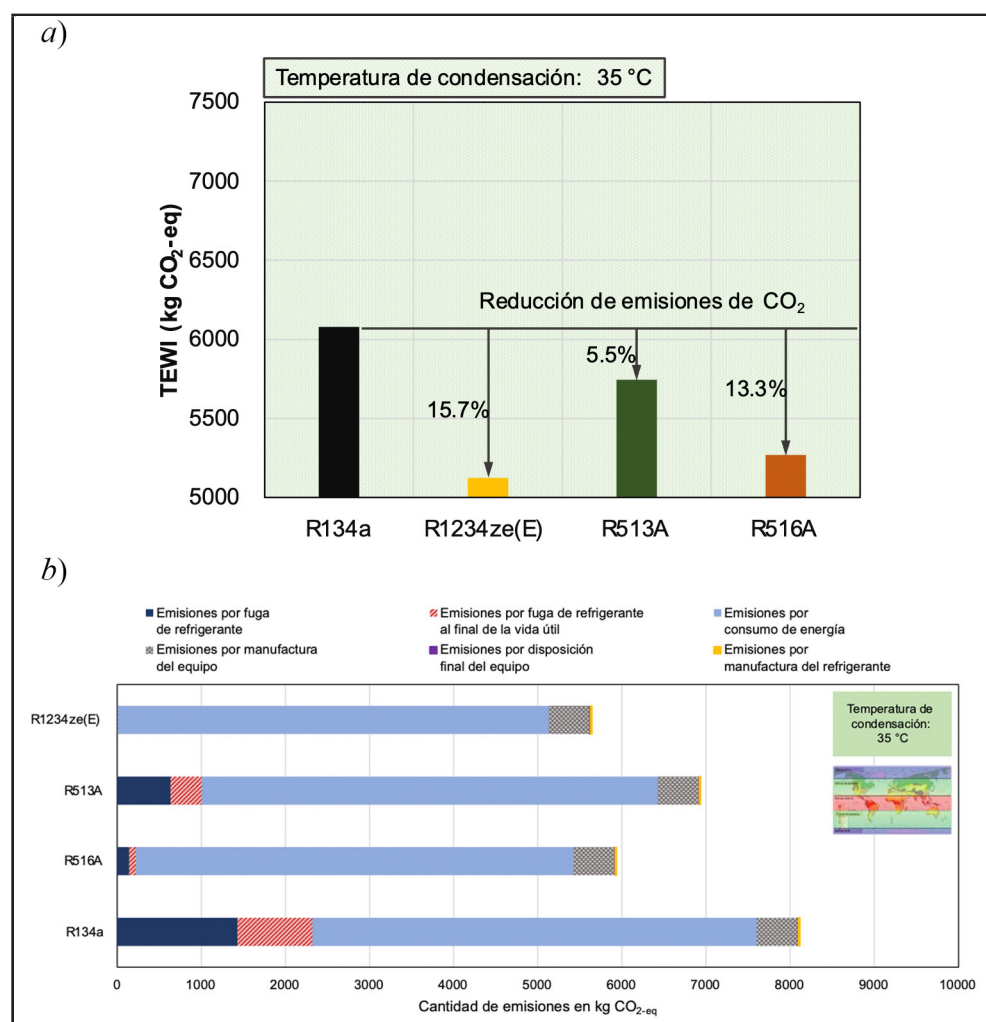
Fuente: elaboración propia.

4. RESULTADOS

Para aplicaciones de refrigeración y aire acondicionado a temperaturas ambiente típicas de climas templados del planeta, estos refrigerantes muestran un desempeño TEWI y LCCP (gráfica 2). Es evidente que estos refrigerantes alternativos exhiben una reducción considerable en las emisiones de CO₂-eq teniendo en cuenta el índice TEWI. Si bien el principal factor que aporta la mayor cantidad de emisiones es el consumo de energía eléctrica y la fuga de refrigerante, parámetros como las emisiones durante la manufactura del equipo y los refrigerantes también son determinantes en el impacto negativo al ambiente. Si tenemos en cuenta que la evaluación se realizó para un solo

sistema de refrigeración, la multiplicación de estas emisiones de CO₂-eq por la cantidad de equipos que operan en la actualidad en el mundo se eleva a valores desproporcionados. Por ejemplo, en Estados Unidos una encuesta del 2015 reveló que 76 millones de hogares utilizan equipos de aire acondicionado y alrededor de 13 millones emplean bombas de calor para calefacción o refrigeración (Mordor Intelligence, 2023). En el caso de México, cerca de 31 millones de refrigeradores se encuentran en uso (INEGI, 2020), también, según cifras reportadas para 2020, alrededor de 6 millones de hogares tenían al menos un equipo de aire acondicionado con una tendencia de crecimiento del 4% aproximada para los próximos años (Mundo HVAC&R, 2023). Por estos motivos, la magnitud de emisiones de CO₂-eq causadas por el sector de la refrigeración es de alto impacto en el mundo.

Con base en el desempeño ambiental de cada refrigerante alternativo en particular, según resultados disponibles en la literatura, el R1234ze(E) ha demostrado ser una opción desde el punto de vista ambiental. Este refrigerante se ha analizado en sistemas de refrigeración doméstica, aire acondicionado, hasta en bombas de calor, que han evidenciado un menor impacto ambiental comparado con el R134a, como consecuencia de su GWP de un dígito. Incluso, debido a sus propiedades termofísicas, para las condiciones evaluadas en este trabajo propias para aplicaciones de refrigeración y aire acondicionado, ha mostrado un menor consumo de energía eléctrica, lo cual reduce de manera significativa las emisiones indirectas de CO₂-eq al ambiente.



GRÁFICA 2

Análisis ambiental de los refrigerantes para una temperatura de condensación de 35 °C según

a) TEWI y b) LCCP

Fuente: elaboración propia.

De igual modo, el R513A ha sido muy investigado. Si bien es un refrigerante que por su GWP > 150 actualmente está pensado para el periodo de transición, también minimiza el impacto al ambiente acentuado en las emisiones directas de CO₂-eq. Por sus propiedades, ha presentado un consumo de energía eléctrica similar o superior al R134a; por lo tanto, la búsqueda hacia sistemas de refrigeración que minimicen el consumo de energía también es necesario.

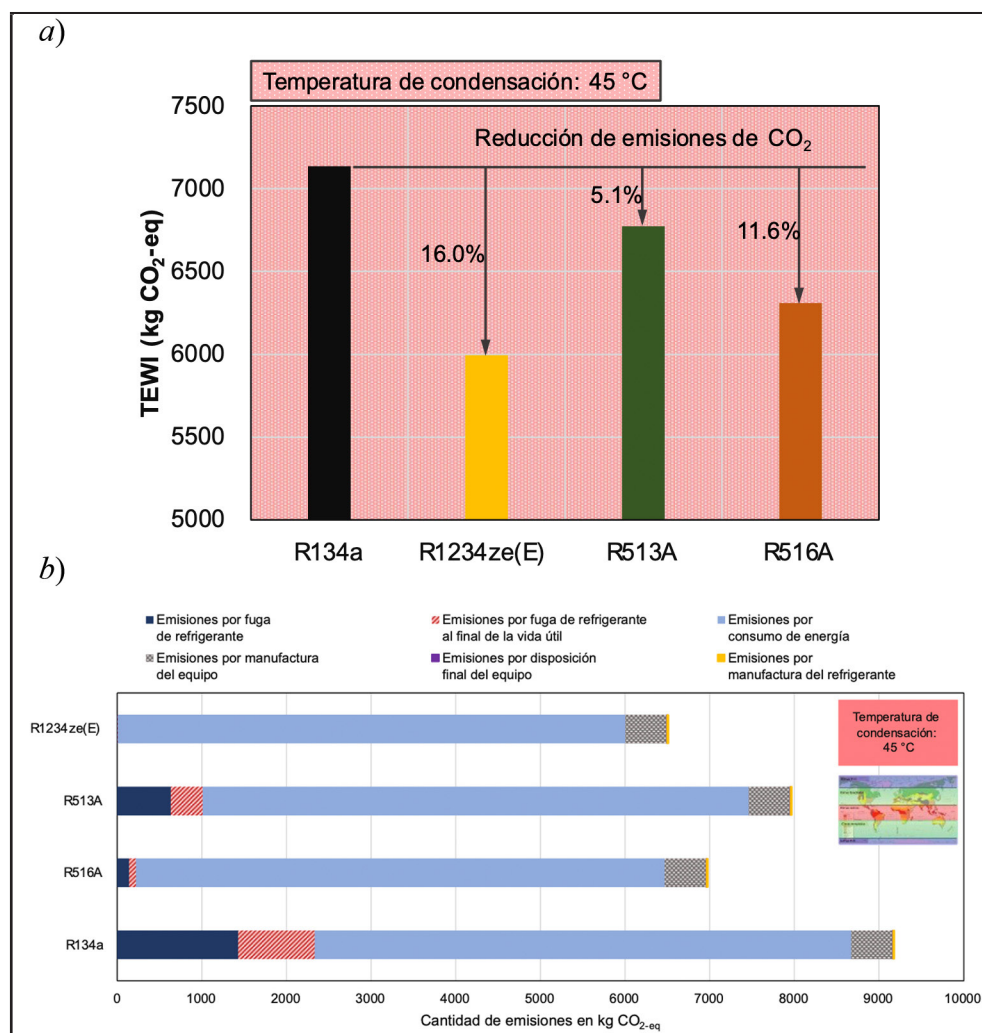
Por su parte, el R516A, como se ha expuesto, es un refrigerante relativamente nuevo que no está disponible de manera comercial, pero que es necesario estudiarlo cuando opera en diferentes condiciones. Algunos trabajos han exhibido un desempeño energético y térmico cercano al R134a, incluso, como en este estudio para la condición de evaporación de 0 °C, muestra una reducción de las emisiones directas función de su GWP de 142 y un decremento en las emisiones indirectas por causa de un menor consumo de energía eléctrica comparado con el R134a. Es importante resaltar que el análisis LCCP ha sido empleado en menor medida que el TEWI. De hecho, bajo la literatura revisada hay un solo trabajo que incluye este tipo de análisis en el desempeño ambiental del R516A (Akinseloyin *et al.*, 2023); los autores alcanzaron una disminución en las emisiones de CO₂-eq respecto al R134a de 9.4%, lo que se asemeja con la reducción obtenida en este trabajo de 13.3%, según el TEWI, y de aproximadamente unos 2 470 kg CO₂-eq, según el rendimiento climático del ciclo de vida.

Si se analiza en este caso una temperatura de condensación de 45 °C, el consumo de energía eléctrica es mayor, es decir, para estas condiciones típicas de regiones calurosas del mundo, la demanda de energía eléctrica del equipo es superior debido a que el sistema trabaja a temperaturas ambiente más altas y, por ende, a una temperatura de condensación elevada, el salto térmico o diferencia de temperatura y presión entre la etapa de condensación y evaporación es muy alta, por lo que se genera de esta manera un mayor esfuerzo o trabajo en el compresor para comprimir el gas, y para cumplir con este requerimiento se consume más energía eléctrica. En este caso, según la gráfica 3, el uso de los refrigerantes alternativos brinda una reducción de las emisiones de CO₂-eq según el TEWI es de hasta 16.0%, 5.1%, y 11.6% si empleamos R1234ze(E), R513A, y R516A respectivamente.

Con base en el LCCP, se registra un alto impacto del uso de los sistemas de refrigeración para las condiciones de operación en climas cálidos y también se observa una gran reducción de la cantidad de emisiones al usar los refrigerantes R1234ze(E) y R516A. Si tenemos en cuenta que el consumo de energía eléctrica para los refrigerantes alternativos es bastante similar al R134a, el bajo GWP de estos refrigerantes hace que el impacto negativo en el ambiente sea mucho menor comparado con el R134a. Las reducciones en kg CO₂-eq alcanzadas por los refrigerantes R1234ze(E), R513A y R516A se establecen en 2204, 1212 y 2669, en el orden dado.

ANÁLISIS PROSPECTIVO

Desde el sector de la refrigeración es posible contribuir al cuidado del medioambiente ayudando a que el calentamiento global no sufra un aumento significativo. Si bien hay pautas trazadas a nivel mundial para la sustitución de refrigerantes con alto potencial de calentamiento global, es necesaria esa búsqueda de alternativas que favorezcan a esos objetivos de reemplazo. La medición de su impacto directo e indirecto de estas nuevas sustancias constituye un factor determinante para su selección y aplicabilidad en distintos equipos de refrigeración y aire acondicionado. Se acercan fechas clave en cuanto al alcance de límites de emisiones de gases de efecto invernadero y aumento de temperatura del planeta, por lo que estos nuevos refrigerantes para el sector de la refrigeración son indispensables. Asimismo, para disminuir la gran cantidad de energía eléctrica que consumen los sistemas de refrigeración y aire acondicionado, la adopción de algunas alternativas como las energías renovables, equipos más eficientes y refrigerantes competitivos se traduce en una reducción del consumo energético que ayude a conservar el medioambiente.



GRÁFICA 3

Análisis ambiental de los refrigerantes para una temperatura de condensación de 45 °C
según a) TEWI y b) LCCP

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

Desde el punto de vista ambiental, en este artículo se evaluaron refrigerantes alternativos para el reemplazo del R134a, que es ampliamente usado en sistemas de refrigeración y aire acondicionado. Al respecto, las principales conclusiones son las siguientes:

- Mediante los índices TEWI y LCCP se evidencia el alto impacto ambiental del uso de sistemas de refrigeración y aire acondicionado que usan R134a.
- Solo en función de su GWP, según el TEWI y el LCCP durante el ciclo de vida útil de la instalación a las condiciones de operación consideradas, las emisiones directas de CO₂-eq se reducirían hasta en un 58.1%, 91.1% y 99.6% para los refrigerantes R513A, R516A y R1234ze(E), en ese orden.
- Con base en las condiciones experimentadas en la instalación de refrigeración, los refrigerantes R1234ze(E) y R516A resultaron ser la mejor opción para el reemplazo del R134a debido a su amplia reducción del impacto negativo en el ambiente, ya que logra disminuir las emisiones de CO₂-eq hasta en un 16.0% y un 13.3% para el R1234ze(E) y R516A respectivamente.

- d) Uno de los parámetros que afecta de manera significativa la cantidad de emisiones de CO₂-eq es el consumo de energía eléctrica. El R513A ha evidenciado una demanda de energía similar o incluso superior al R134a; sin embargo, los refrigerantes R1234ze(E) y R516A garantizan un requerimiento menor de dicho factor comparado con el R134a, por lo que, según el TEWI y LCCP, estos refrigerantes para la condición de 35 °C pueden reducir las emisiones indirectas por consumo de energía en un 6.8% y 5.1%, respectivamente, y 8.5% y 4.5%, para la condición de 45 °C.
- e) Para las temperaturas de condensación de 35 °C y 45 °C, los refrigerantes alternativos que se probaron representan una reducción de las emisiones de CO₂-eq comparado con el R134a. En este sentido, el R513A es una opción viable en el corto plazo. Así, el R1234ze(E) y R516A son los refrigerantes de mayor proyección en el presente y futuro.

AGRADECIMIENTOS

D. Méndez-Méndez agradece el apoyo económico recibido por parte del CONAHCYT a través de la beca de doctorado. De igual forma, se extienden los agradecimientos a los revisores del artículo por sus comentarios y observaciones para mejorar su estructura y calidad.

REFERENCIAS

- AIRAH (The Australian Institute of Refrigeration, Air Conditioning and Heating). (2012). *Methods of calculating total equivalent warming impact (TEWI)*. <http://www.airah.org.au>
- Akinseloyin, M. O., Hall, C., Stallbaumer-Cyr, E. M., Morrow, J. A., & Derby, M. M. (2023). Analyzing the carbon dioxide emissions of R134a alternatives in water-cooled centrifugal chillers using the life cycle climate performance framework. *Frontiers in Energy Research*, 11, 1293993. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1293993>
- Al-Sayyab, A. K. S., Navarro-Esbrí, J., Barragán-Cervera, Á., Kim, S., & Mota-Babiloni, A. (2022). Comprehensive experimental evaluation of R1234yf-based low GWP working fluids for refrigeration and heat pumps. *Energy Conversion and Management*, 258, 115378. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115378>
- Azar, C., & Johansson, D. J. (2012). On the relationship between metrics to compare green house gases the case of IGTP, GWP and SGTP. *Earth System Dynamics*, 3(2), 139-147.
- Bitzer. (2023). *Sistema de climatización*. <https://www.bitzer.de/es/es/aire-acondicionado-y-refrigeracion-de-procesos/sistema-de-climatizacion/>
- CRE (Comisión Reguladora de Energía). (2023). *Factor de Emisión del Sistema Eléctrico Nacional 2023*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/896217/aviso_fesen_2023.pdf
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). (2020). *ENIGH (Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares). Nueva serie*. <https://www.inegi.org.mx/programas/enigh/nc/2020/#-Tabulados>
- EPA (Environmental Protection Agency). (2016). *Transitioning to low-GWP alternatives in commercial refrigeration*. USA Environmental Protection Agency.
- EUR-Lex. (2024). *Regulation (EU) 2024/573 of the European Parliament and of the Council of 7 February 2024 on fluorinated greenhouse gases, amending Directive (EU) 2019/1937 and repealing Regulation (EU) No 517/2014 (Text with EEA relevance)*. *Official Journal of the European Union*. <http://www.eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/573/oj>

- IIR (International Institute of Refrigeration). (2017). *35th Informatory Note on Refrigeration Technologies/ The impact of the refrigeration sector on climate change*. <http://www.iifiir.org/en/fridoc/the-impact-of-the-refrigeration-sector-on-climate-change-141135>
- IIR (International Institute of Refrigeration). (2019). *38th informatory note on refrigeration technologies/the role of refrigeration in the global economy*. <http://www.iifiir.org/en/fridoc/the-role-of-refrigeration-in-the-global-economy-2019-142028>
- Llopis, R., Calleja-Anta, D., Maiorino, A., Nebot-Andrés, L., Sánchez, D., & Cabello, R. (2020). TEWI analysis of a stand-alone refrigeration system using low-GWP fluids with leakage ratio consideration. *International Journal of Refrigeration*, 118, 279-289. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.05.028>
- Méndez-Méndez, D., Pérez-García, V., Belman-Flores, J. M., Riesco-Ávila, J. M., & Barroso-Maldonado, J. M. (2022). Internal heat exchanger influence in operational cost and environmental impact of an experimental installation using low GWP refrigerant for HVAC conditions. *Sustainability*, 14(10), 6008. <https://doi.org/10.3390/su14106008>
- Méndez-Méndez, D., Pérez-García, V., & Morales-Fuentes, A. (2023). Experimental energy evaluation of R516A and R513A as replacement of R134a in refrigeration and air conditioning modes. *International Journal of Refrigeration*, 154, 73-83. <https://doi.org/10.106/j.ijrefrig.2023.06.003>
- Miranda, N., Khosla, R., Lynch, J., Allen, M., & McCulloch, M. (2023). *Global warming from refrigerant HFCs is underestimated by their CO₂ equivalent emissions within the century* (Preprint). <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2349691/v1>
- Mordor Intelligence. (2023). *Análisis de participación y tamaño del mercado de HVAC de EE. UU. tendencias de crecimiento y pronósticos (2024-2029)*. <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/united-states-hvac-services-market>
- Mundo HVAC&R. (2023). *Estimaciones de crecimiento para el mercado HVAC en el 2023*. <https://www.mundo-hvacr.com/2023/01/estimaciones-de-crecimiento-para-el-mercado-hvac-en-el-2023/>
- Purohit, P., Borgford-Parnell, N., Klimont, Z., & Høglund-Isaksson, L. (2022). Achieving Paris climate goals calls for increasing ambition of the Kigali amendment. *Nature Climate Change*, 12(4), 339-342. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01310-y>
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2018). *El ciclo de refrigeración*. [http://apps2.semarnat.gob.mx:8080/sissao/archivos/Ciclo de Refrig.pdf](http://apps2.semarnat.gob.mx:8080/sissao/archivos/Ciclo%20de%20Refrig.pdf)
- Torres Gomez, R. I. (2011). *Principios de refrigeración*. Instituto Tecnológico de Minatitlán. <https://temariosformativosprofesionales.files.wordpress.com/2015/02/principios-de-refrigeracion.pdf>
- UNIDO (United Nations Industrial Development Organization). (2009). *Preparing for HCFC phase-out: Fundamentals of uses, alternatives, implications and funding for article 5 countries*. https://www.unido.org/sites/default/files/2009-10/Preparing_for_HCFC_phaseout_0.pdf
- Wang, F., & You, T. (2023). Comparative analysis on the life cycle climate performance of ground source heat pump using alternative refrigerants. *Case Studies in Thermal Engineering*, 42, 102761. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102761>
- Wan, H., Cao, T., Hwang, Y., Radermacher, R., Andersen, S. O., & Chin, S. (2021). A comprehensive review of life cycle climate performance (LCCP) for air conditioning systems. *International Journal of Refrigeration*, 130, 187-198. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.06.026>
- Wang, Y., Cao, Q., Liu, L., Wu, Y., Liu, H., Gu, Z., & Zhu, C. (2022). A review of low and zero carbon fuel technologies: Achieving ship carbon reduction targets. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 54, 102762. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102762>



Disponible en: <https://cienciaergosum.uaemex.mx/article/view/21788>

Cómo citar el artículo:

Pérez-García, V. y Méndez-Méndez, D. (2025). Calentamiento global y refrigerantes: realidad y futuro. *CIENCIA ergo-sum*, 32. <https://doi.org/10.30878/ces.v32n0a30>

DOI: <https://doi.org/10.30878/ces.v32n0a30>



Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.

Declaración de autoría (CRediT):

Vicente Pérez-García: conceptualización, metodología, administración del proyecto, supervisión, redacción-borrador original, redacción-revisión y edición.

Dario Méndez-Méndez: curación de datos, análisis formal, investigación, *software*, validación, visualización, redacción-borrador original, redacción-revisión y edición.