

CO₂: La verdad incómoda

Ahora hay tecnologías mejores que el CO₂ para los sistemas de refrigeración en supermercados



Introducción

Se han publicado varios artículos durante los últimos 12-18 meses **que plantean dudas sobre las credenciales ecológicas del R-744** como refrigerante, debido a su eficiencia energética inherentemente escasa.

Esto, a su vez, presenta los interrogantes básicos de por qué la industria escogió una tecnología con emisiones totales relativamente altas; y deben considerarse otras tecnologías antes de tener una opinión definitiva sobre qué opción de PCA bajo tiene el impacto ambiental más bajo y la mejor relación calidad-precio.

Desde una perspectiva de las emisiones que causan cambio climático, es obvio que cualquier pérdida significativa del refrigerante de alto PCA R-404A (3922) fácilmente compensa cualquier beneficio de eficiencia energética visto al usar el refrigerante R-744. Por supuesto, el problema cuando se escoge la tecnología R-744 es que el equipo es más complejo, más costoso y tiene menos eficiencia energética. **Esto contribuye a un Coste del Ciclo de Vida a 10-años más alto, pero el foco de las Regulaciones F-Gas de la UE principalmente se centran en un PCA bajo, no en el coste, de modo que el refrigerante R-744 parecía ser una buena opción...**



¿PERO LO ES REALMENTE?

¿Qué opciones había disponibles inicialmente?

El uso del R-744 como refrigerante, por supuesto, no es algo nuevo. Durante el desarrollo de los sistemas de refrigeración por compresión de vapor a fines del siglo XIX, el éter dietílico, el amoníaco y el dióxido de carbono (R-744) se consideraban comúnmente como fluidos refrigerantes. A medida que se desarrollaba la tecnología de compresión de vapor, la inflamabilidad del éter dietílico y la escasa eficiencia energética del R-744 demostraban ser más difíciles de superar que la inflamabilidad y la toxicidad bajas del amoníaco, lo que disminuyó la popularidad del R-744.

A fines del siglo XX, acuerdos como el Protocolo de Kioto (1997) aumentaron la concientización del espectro del cambio climático global y los gases que contribuyen a dicho cambio. Con un PCA de 1, el refrigerante R-744 parecía ser un candidato perfecto y se lanzaron muchos proyectos de investigación para afrontar las fallas en la eficiencia energética mencionadas previamente.

Después de la eliminación gradual de los clorofluorcarbonos (CFC) a principios de la década de 1990, el R-404A se convirtió en la opción dominante en refrigerantes para la refrigeración comercial, con frecuencia en sistemas con regímenes de mantenimiento deficientes e índices de fugas anuales muy altos (ALR) (>15%). Desde una perspectiva de las emisiones que causan cambio climático, estos índices de fugas muy altos, combinados con el PCA alto del R-404A (3922), fácilmente compensaron cualquier beneficio de eficiencia energética de usar el refrigerante R-744 (Figura 1).

Todo esto condujo a la Flash Gas Bypass (FGB) del refrigerante R-744 transcrítico o que el sistema de booster se convirtiera en la tecnología de PCA bajo más común elegida en la actualidad por las tiendas minoristas para equipos nuevos.

El inconveniente cuando se elige la tecnología R-744 es que el equipo es más complejo y costoso, y la eficiencia energética escasa conduce a un coste del ciclo de vida (CCV) a 10-años más alto (CCV de 10-años, Figura 2), pero las regulaciones principalmente se centran en el PCA bajo sin tener en cuenta el coste, entonces el refrigerante R-744 parecía ser una buena opción.

A partir de 2021, la regulación F-Gas de la UE prohibirá el uso de refrigerantes con PCA ≥ 150 en sistemas de refrigeración comercial de multi-compresores \geq capacidad 40kW. Finalmente, en 2030, en la eliminación gradual de F-Gas de la UE, cuando deba lograrse un promedio aproximado de 400 PCA. Por estos motivos, si bien el uso de refrigerantes con PCA moderadamente bajo como Opteon™ XP40 reduce el CCV de 10-años y las emisiones totales 36-47% en comparación con el refrigerante R-404A, con ALR de 10%, aún tiene emisiones totales más altas que un sistema R-744 FGB transcrítico equivalente, incluso en climas cálidos (Figura 1) y, por ende, no es una opción práctica a largo plazo para equipos nuevos de conformidad con la regulación F-Gas de la UE.

Figura 1

Comparación de emisiones totales de 10-años (T_{eqCO_2}) usando R-404A (ALR de 10%), Opteon™ XP40 (ALR de 10%) y sistemas R-744 FGB transcríticos para un supermercado estándar (superficie del local de venta de ~2000m², 160 kW a temperatura media/30 kW a temperatura baja) en diferentes climas

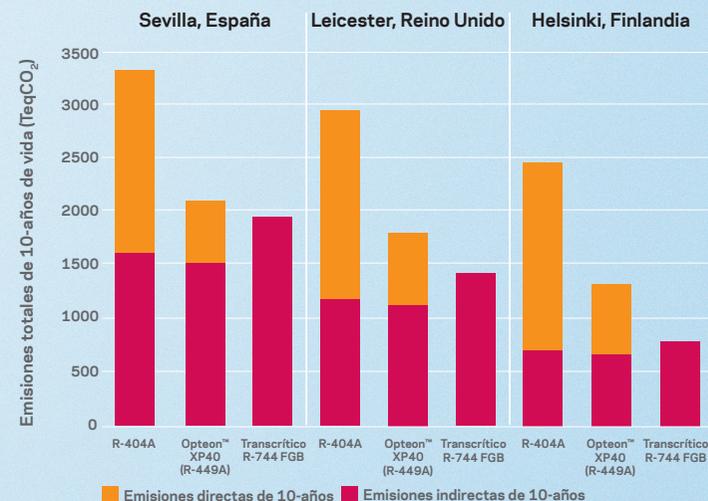
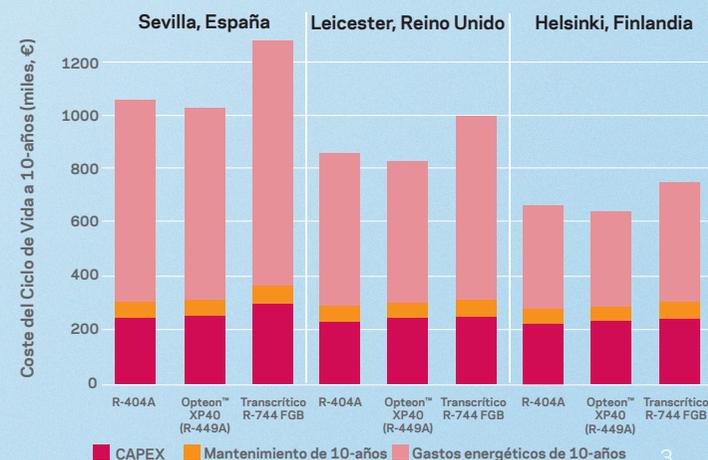
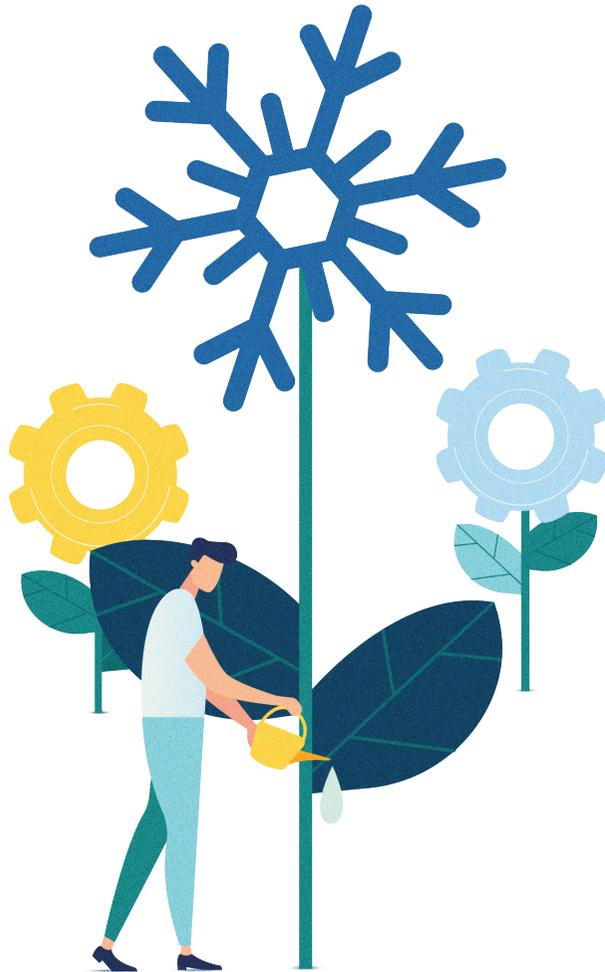


Figura 2

Comparación de Coste del Ciclo de Vida a 10-años usando el sistema R-744 FGB transcrítico, R-404A y sistemas Opteon™ XP40 para un supermercado estándar (superficie del local de venta de ~2000m², 160 kW a temperatura media/30 kW a temperatura baja) en diferentes climas



¿Hay una opción mejor que R-744?



Además de reducir las emisiones totales que producen cambio climático, los minoristas han expresado el deseo de elaborar una lista de criterios que su elección de tecnología de refrigeración debería cumplir:

- **Alcanzar el rendimiento de refrigeración**
- **Alcanzar o superar el rendimiento energético**
- **Alcanzar el período de uso del sistema (minimizar el riesgo del mercado)**
- **Alcanzar o mejorar el coste total a la propiedad**
E
- **Idealmente, alcanzar la facilidad de instalación y el mantenimiento**

Aunque el refrigerante R-744 alcanza el objetivo principal de reducir las emisiones totales, aparte de alcanzar el rendimiento de refrigeración, el uso de R-744 no necesariamente cumple con los demás criterios deseados.

Claramente, puede mejorarse la elección de la tecnología.

Las mezclas de refrigerantes A2L con PCA muy bajo tales como Opteon™ XL20 y Opteon™ XL40 han estado disponibles comercialmente desde 2016, pero el hecho de que el foco de muchos minoristas se centró en reconvertir equipos existentes de R-404A antes de la prohibición del servicio de F-Gas de la UE de 2020 ha significado que las oportunidades para explorar los beneficios que tienen estas opciones, hasta ahora, hayan sido limitadas.

Dentro del sector de la refrigeración, la primera aplicación comercial de la gama de refrigerantes Opteon™ XL con PCA muy bajo se hizo en octubre de 2017, cuando se instaló un almacén de baja temperatura en Park Cake Bakeries, en Oldham (Reino Unido), usando Opteon™ XL40. Elevar el perfil de esta tecnología alternativa resultó interesante para los minoristas y poder usarla en la refrigeración de supermercados. Los equipos y componentes de los productos Opteon™ XL ahora están disponibles, como lo prueban las instalaciones hechas por un gran minorista, ASDA y Central England Co-op en el Reino Unido, lo que significa que el uso de la gama Opteon™ XL con PCA muy bajo ahora es una opción válida para que la consideren los minoristas.

Un estudio que llevó a cabo Wave Refrigeration consideró el uso de productos Opteon™ XL con PCA muy bajo basados en la experiencia práctica publicada obtenida en el trabajo de ASDA.

Los refrigerantes Opteon™ XL20 y Opteon™ XL40 con PCA muy bajo, combinados con los índices de fuga mejorados que lograron minoristas responsables (<5%), reducen en gran medida la contribución de emisiones directas de refrigerantes que, combinado con el rendimiento energético mejorado cuando se usan refrigerantes Opteon™ XL, tiene como resultado que las emisiones totales de un supermercado de tamaño estándar (superficie del local de venta de ~2000m²) son inferiores a las emisiones totales de un sistema R-744 FGB transcrito equivalente (Figura 3) en los lugares considerados (Helsinki 6-8% más bajo, Leicester 14-17% más bajo y Sevilla 18-20% más bajo).

Como ahora hay una tecnología de emisiones bajas alternativa que puede alcanzar o reducir las emisiones totales a la atmósfera de un sistema R-744 FGB transcrito, el elemento del coste ahora se convierte en una consideración relevante e importante.

El uso de los sistemas refrigerantes Opteon™ XL ofrece el CAPEX y los costes de mantenimiento más bajos, pero —con creces— el ahorro en costes más significativo en un período de más de 10 años proviene de que el consumo energético más bajo (Figura 4) produce costes del ciclo de vida a 10-años significativos más bajos (Helsinki 8-9% más bajos, Leicester 14% más bajos y Sevilla 17-18% más bajos).

Los resultados de este análisis no dejan dudas de que el uso de los refrigerantes Opteon™XL cumplen con todos los criterios esperados por los minoristas, ya que ofrecen emisiones totales más bajas a un coste inferior que la tecnología R-744 FGB transcrito.



Figura 3

Comparación de emisiones totales (Te_qCO₂) para R-404A, Opteon™ XP40, Opteon™ XL40, Opteon™ XL20, el sistema R-744 FGB y la tecnología R-744 óptima para un supermercado estándar en diferentes climas, usando un ALR de 5%

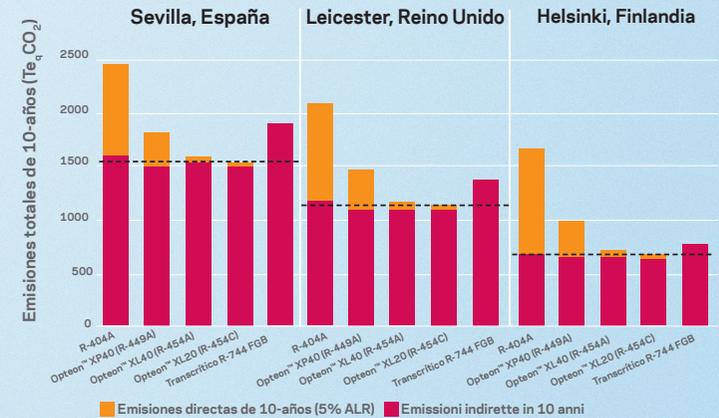
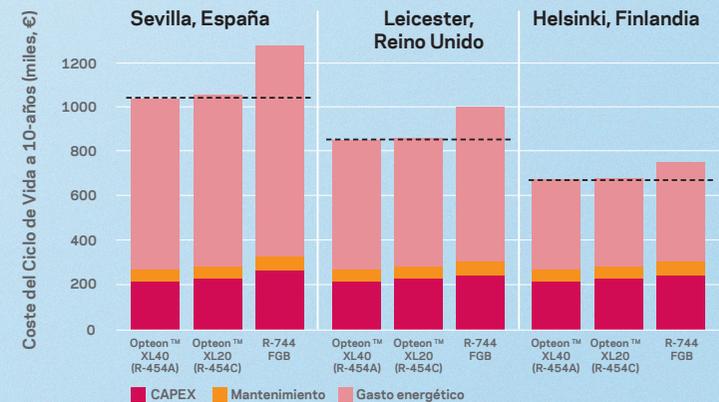


Figura 4

Comparación del Coste del Ciclo de Vida a 10-años para Opteon™ XL40, Opteon™ XL20 y el sistema R-744 FGB para un supermercado estándar en diferentes lugares



¿Hay otras tecnologías R-744 que deban considerarse?

Mientras que la tecnología R-744 FGB transcítica se usa con frecuencia, no es la única arquitectura R-744 que se ha desarrollado. El conocimiento de que los sistemas R-744 tienen una eficiencia energética inherentemente escasa en climas más cálidos ha producido una barrera geográfica, que se ha conocido como el Ecuador del CO₂, donde el uso de sistemas R-744 FGB puede volverse sumamente costoso.

Esto ha derivado en más de una década de desarrollos para intentar mejorar la eficiencia energética del sistema, en particular, en lugares al sur del límite del Ecuador del CO₂ del R-744 FGB. Para mejorar el rendimiento de los sistemas R-744, se implementaron varios cambios en la arquitectura:

- 1. R-744 FGB transcítico + intercambiador de calor interno (IHX)**
- 2. Compresión paralela**
- 3. Compresión paralela + Tecnología de eyectores**

Para el supermercado de tamaño estándar, en todos los lugares considerados en este estudio, la opción del R-744 con el consumo energético más bajo fue la tecnología de eyectores, pero la diferencia en el consumo energético entre el sistema R-744 FGB y los sistemas de eyectores R-744 se redujo significativamente a medida que las condiciones climáticas se volvieron menos cálidas, lo que significó que el CAPEX adicional para esta tecnología puede ser difícil de justificar para el nivel de beneficio logrado.

Debido a que las condiciones climáticas y las emisiones indirectas de la generación de energía tienen un impacto significativo en las emisiones totales resultantes del uso de diversas tecnologías, un método que se usa con frecuencia para determinar la tecnología más rentable para reducir la huella ambiental de un sistema es calcular el coste de la reducción por tonelada de emisiones de CO₂ equivalentes (TeqCO₂) durante un período de 10-años.

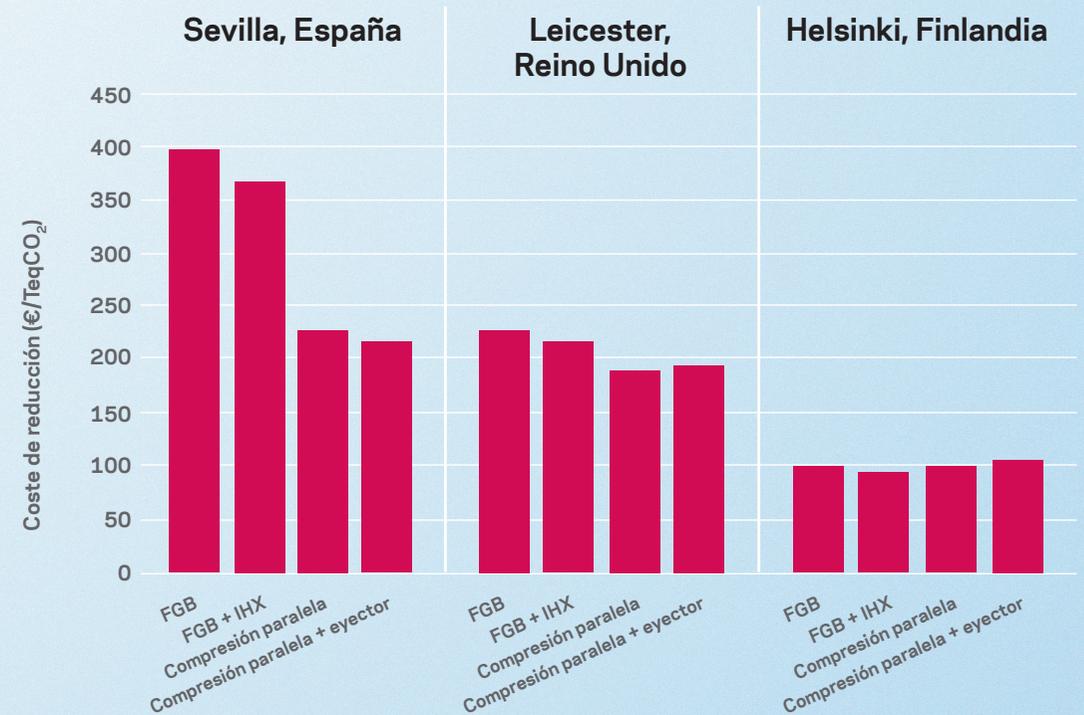
Los costes relativos de reducción de emisiones pueden calcularse dividiendo la diferencia en el CCV a 10-años de la tecnología alternativa (en comparación con R-404A) por la diferencia en las emisiones totales a 10-años de la tecnología alternativa (en comparación con R-404A, ALR de 5%) para dar un coste de reducción de €/TeqCO₂.

Este enfoque no muestra qué tecnologías ofrecen las mayores reducciones, pero da una visión real de qué tecnologías ofrecen la mejor relación calidad-precio para lograr un nivel determinado de reducciones de emisiones (o reducción de la huella de carbono), que en este caso es al menos equivalente a la tecnología R-744 FGB.

Este enfoque revela que la tecnología R-744 óptima para cada lugar es diferente, es decir, la tecnología de eyectores R-744 para Sevilla, de compresión paralela para Leicester y FGB + IHX para Helsinki (Figura 5).

Figura 5

Costes de reducción de las diversas tecnologías R-744 para determinar la tecnología óptima para cada lugar



$$\text{Coste relativo de reducción de emisiones de CO}_2 = \frac{(\text{CCV}_{\text{Alt}} - \text{CCV}_{\text{R-404A}})}{(\text{Emisiones}_{\text{R-404A}} - \text{Emisiones}_{\text{Alt}})}$$

En la condición climática cálida de Sevilla, España, la mejora del rendimiento en relación con un sistema R-744 FGB estándar usando la tecnología de eyectores en un supermercado estándar es significativa (CCV a 10-años 5% más bajo y emisiones totales de 10-años 9% más bajas), pero resulta insignificante cuando se lo compara con la utilización de tecnologías refrigerantes Opteon™ XL, que ofrecen un CCV a 10-años 17-18% más bajo (Figura 6) y emisiones 18-20% más bajas (Figura 7) en comparación con un sistema R-744 FGB estándar.

En la condición climática moderada de Leicester, Reino Unido, la mejora del rendimiento en comparación con R-744 FGB usando la tecnología de compresión paralela óptima es aún menos significativa (CCV a 10-años 2% más bajo y emisiones totales de 10-años 4% más bajas); mientras que el uso de tecnologías refrigerantes Opteon™ XL sigue ofreciendo una reducción muy significativa (CCV a 10-años 14% más bajo y emisiones totales de 10-años 15-17% más bajas) en comparación con un sistema 744 FGB estándar.

La tendencia continúa en la condición climática más fría, de coste energético bajo y emisiones energéticas bajas de Helsinki, Finlandia, con una mejora de solo 1% o menos en comparación con un sistema R-744 FGB estándar usando la tecnología R-744 FGB óptima + IHX. En comparación, las tecnologías refrigerantes Opteon™ XL ofrecen emisiones 6-8% más bajas con un CCV a 10-años 8-9% más bajo que el sistema R-744 FGB estándar.

Figura 6

Comparación de Coste del Ciclo de Vida a 10-años de R-744 FGB y la tecnología R-744 óptima con tecnologías refrigerantes Opteon™ XL para una arquitectura de supermercado estándar en diferentes lugares

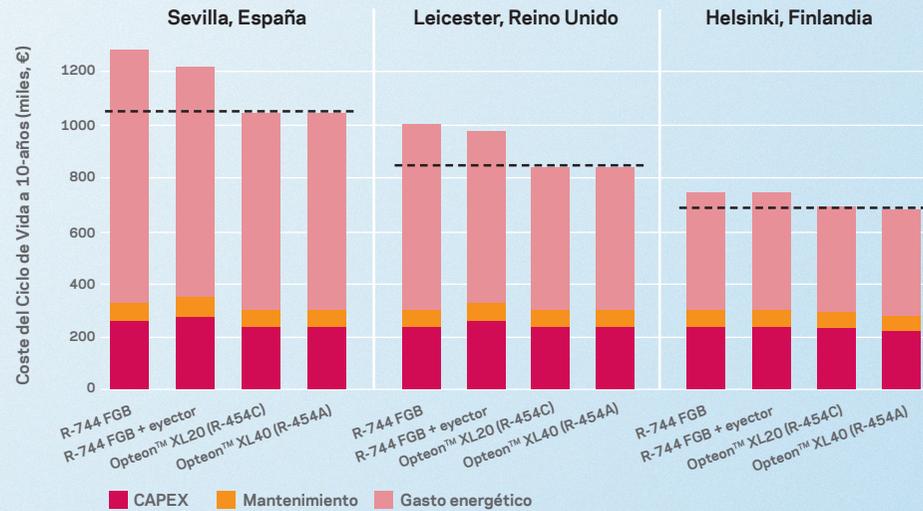
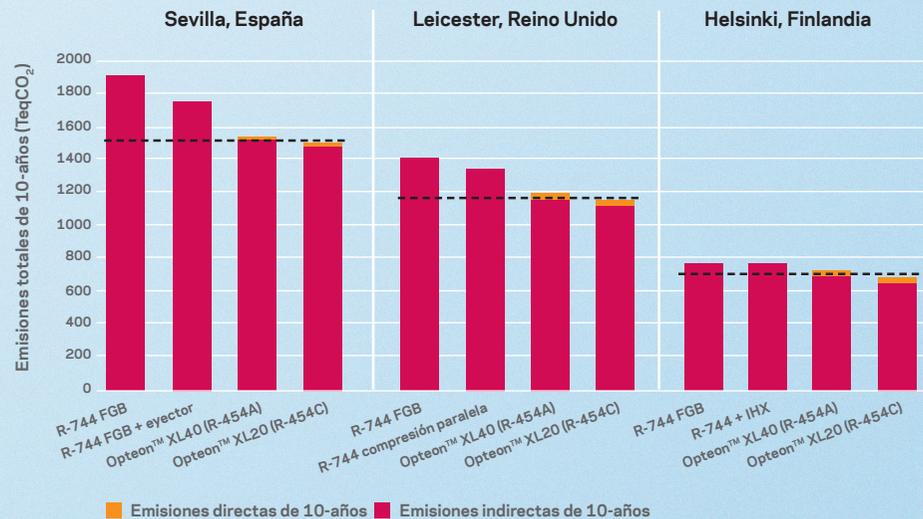


Figure 7

Comparación de emisiones totales de 10-años de R-744 FGB y la tecnología R-744 óptima con tecnologías refrigerantes Opteon™ XL para una arquitectura de supermercado estándar en diferentes lugares (ALR de 5%)



El uso de estas tecnologías R-744 mejoradas disminuye el coste de reducción en comparación con el uso de tecnología R-744 FGB estándar, pero en todos los lugares, los costes de reducción son >70% más bajos cuando se usa una tecnología refrigerante Opteon™ XL (Figura 8).

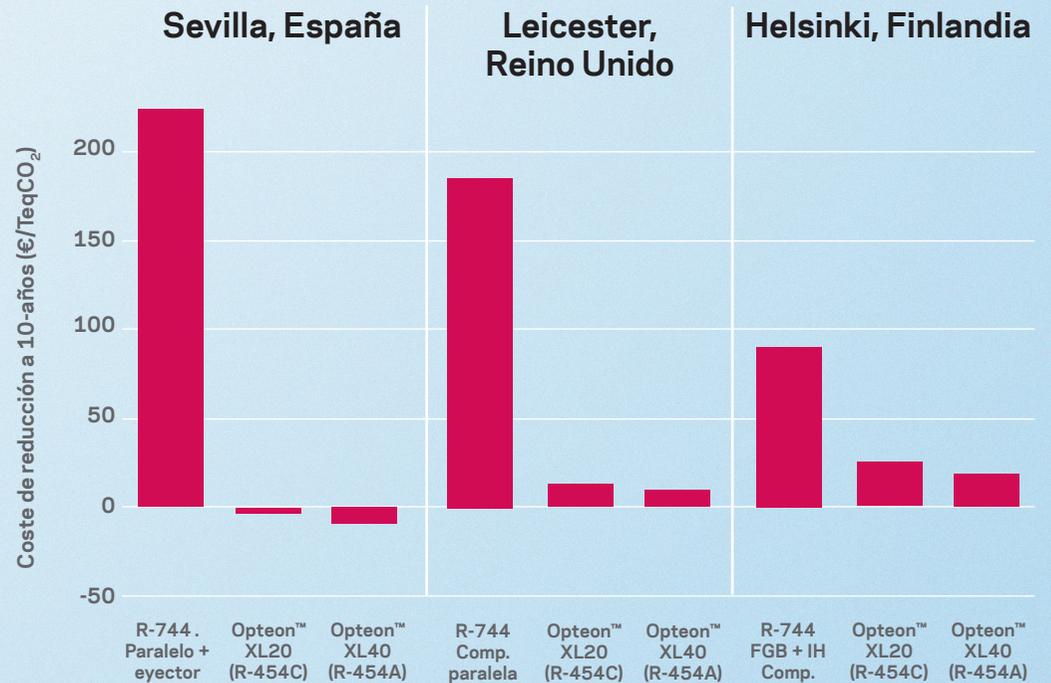
En las condiciones climáticas cálidas de Sevilla, el uso de refrigerantes Opteon™ XL no solo reduce las emisiones, sino que también ofrece la disminución de emisiones necesaria a un coste de 10-años más bajo que si el sistema todavía estuviera operando con R-404A, sin disminución de emisiones, es decir, un coste de reducción negativo (-3 a -10 € por TeqCO₂).

De esto resulta una comparación muy favorable con respecto a las tecnologías R-744 óptimas; por ejemplo, en Sevilla, usando la tecnología de eyectores R-744 óptima, el coste de reducción es €218 por TeqCO₂.

En el clima moderado de Leicester, los costes de reducción en comparación con el uso del sistema R-744 + compresión paralela son 92-96% más bajos cuando se usan refrigerantes Opteon™ XL y aun en la condición climática más fría, de carbono bajo y generación de energía a bajo coste de Helsinki, el coste de reducción es 73-83% más bajo cuando se usan los refrigerantes Opteon™ XL en comparación con un sistema R-744 FGB + IHX transcrítico.

Figure 8

Costes de reducción de TeqCO₂ de 10-años (en comparación con R-404A con ALR de 5%) en una arquitectura de supermercado estándar usando la tecnología R-744 óptima en diversos lugares en comparación con la tecnología refrigerante Opteon™ XL (ALR de 5%)



Incómoda o no, la verdad es que...

Con un PCA directo muy bajo, el sistema R-744 inicialmente parecía ser una buena opción para reemplazar la tecnología R-404A de emisiones altas, pero la eficiencia energética inherentemente baja y la complejidad de los sistemas R-744 han dejado muchos interrogantes con respecto a si esta tecnología es realmente la mejor opción.

La introducción de los refrigerantes Opteon™ XL20 y Opteon™ XL40 con PCA muy bajo ha demostrado ser una alternativa viable para los sistemas R-404A y R-744, tanto en aplicaciones de refrigeración de supermercados estándar como pequeños. La experiencia práctica de las instalaciones ha demostrado un rendimiento energético mejorado en comparación con el sistema R-404A, a la vez que se mantienen los costes de equipos similares,

la simplicidad y la fiabilidad del sistema; y todo esto se ha logrado con las emisiones totales a 10-años más bajas de todas las alternativas de PCA bajo utilizadas comúnmente.

En cuanto a los costes de reducción de TeqCO_2 , se ha demostrado que el uso de los refrigerantes Opteon™ XL es, con creces, la tecnología más rentable para reducir la huella ambiental para una instalación. Los resultados varían en gran medida, según el lugar y el tamaño de la tienda, y oscilan desde un coste de reducción de >70% más bajo (en comparación con la tecnología R-744 óptima) en la condición climática más fría, de coste bajo y generación de energía con emisiones de carbono bajas de Helsinki hasta un coste de reducción >100% más bajo (en comparación con la tecnología R-744 óptima) para un

supermercado estándar en el clima cálido de Sevilla. Entonces, si busca una tecnología alternativa al R-404 con PCA muy bajo que logre:

- **Alcanzar el rendimiento de refrigeración**
 - **Alcanzar o superar el desempeño energético**
 - **Alcanzar el período de uso del sistema (minimizar el riesgo del mercado)**
 - **Alcanzar o mejorar el coste total a la propiedad**
- E**
- **Idealmente, alcanzar la facilidad de instalación y el mantenimiento**

Refrigerantes Opteon™ XL...
¿Por qué elegiría otro?

