

GENERACION HFO: REFRIGERANTES MÁS EFICIENTES Y CON MUY BAJO PCA PARA REFRIGERACION Y CLIMATIZACIÓN

Autor de la comunicación: Jose Pedro García Espinosa¹

1 Chemours Spain S.L. Valle de Tamón s/n. 33469 Carreño – Asturias. España. jose.garcia@chemours.com.

RESUMEN: Los fluidos HFC más utilizados en refrigeración y climatización son objeto de regulaciones a causa de su alto potencial de calentamiento global (PCA/GWP)

Para una mejora de la sostenibilidad medioambiental y de la eficiencia energética, se está investigando mucho sobre esta familia, las hidro-fluoro-olefinas (HFO). Sus muy bajos valores de PCA los hacen muy atractivos, pero en algunos casos, por sí solos, no son plenamente satisfactorios para el diseño de sistemas de refrigeración y aire acondicionado, debido a cuestiones de seguridad y capacidad frigorífica. Tenemos una serie de fluidos puros y mezclas refrigerantes que, al tiempo que mejoran las propiedades medioambientales respecto a los refrigerantes tradicionales, proporcionan altas prestaciones tanto a nivel de rendimiento, seguridad y eficiencia energética. Analizamos varios refrigerantes desarrollados para satisfacer las necesidades ambientales, físicas, técnicas y de seguridad. La mayor parte ya son comerciales y todos ellos cuentan con aprobaciones y respaldo de fabricantes de los componentes de sistemas.

Tenemos dos grupos de productos:

Productos ligeramente inflamables (Clasificación 2L) para equipos nuevos: R-454C, R-454A, R-454B, R-452B, HFO-1234yf.

Productos no inflamables (Clasificación 1) para equipos nuevos y existentes: R-449A, R-452A, R-513A, R-514A.

Evaluamos productos, ventajas e inconvenientes, capacidad frigorífica, eficiencia energética...

Presentamos datos teóricos y reales de sistemas en funcionamiento.

Hacemos distinción entre productos diseñados para sistemas existentes y productos para sistemas nuevos.

Hablamos de la clasificación de seguridad 2L, resolviendo dudas sobre la manipulación de productos adscritos a la misma. Comentamos las nuevas exigencias de la revisión de la Norma EN378 referente a seguridad en sistemas.

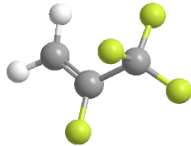
Palabras clave: HFO, COP, inflamabilidad, PCA

1. INTRODUCCIÓN – LOS HFO

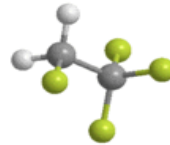
Comenzar diciendo que todavía no existe consenso alguno sobre cuáles son las propiedades claves que deberían presentar los fluidos utilizados como refrigerantes. Sea a nivel legislativo, como en los distintos foros del sector, se están proponiendo características tales como una alta eficiencia energética, bajo rendimiento climático del ciclo de vida (LCCP), bajo PCA directo, rendimiento frigorífico similar al de los fluidos comerciales actuales (o superior), no inflamabilidad, baja toxicidad y otras. No se ha identificado aún un solo candidato que reúna todos los requisitos propuestos para un fluido refrigerante ideal.

Para poder dar una alternativa a la industria se ha desarrollado una nueva generación de refrigerantes, las hidro-fluoro-olefinas (HFO) cuya principal característica es la de ofrecer un comportamiento muy similar a los HFC (en cuanto a capacidad frigorífica, consumo energético...), pero con un PCA muy cercano a 1 en la mayoría de los casos. Por desgracia estos productos no pueden, por sí solos, cubrir todo el espectro de sistemas de refrigeración

y climatización, y en muchos casos deben formar parte de mezclas de fluidos con algunos HFC para poder obtener el resultado deseado. Algunos de estos productos están englobados en una nueva clasificación de seguridad/inflamabilidad (2L), de la que hablaremos más adelante, que se ha creado para regularizar su uso.



Molécula de HFO-1234yf



Molécula de R-134a

Este documento analiza varios fluidos candidatos que se han desarrollado con el objetivo de satisfacer tres de las características citadas más habitualmente como esenciales para un futuro refrigerante: propiedades ambientales, propiedades físicas y rendimiento frigorífico. Cada uno de estos fluidos candidato posee propiedades deseables, pero diferentes. La mayoría de estos fluidos ya son comerciales y poseen una denominación ASHRAE, habiendo sido evaluados también en el Programa de Evaluación de Refrigerantes Alternativos (AREP) de AHRI (Instituto Americano de Calefacción y Refrigeración): uno de ellos es un gas ligeramente inflamable 2L que proporciona una capacidad cercana a la del R-410A, denominado R-454B, similar a este tenemos el R-452B, también clasificado A2L pero con unas características algo diferentes al anterior; otro consiste en una composición no inflamable de características similares al R-22 y apto para equipos de climatización en entornos con alta temperatura ambiente, designado como DR-91 (aún en período de prueba). El cuarto es un refrigerante ligeramente inflamable (2L) con un PCA directo inferior a 150 (146 según AR5), denominado R-454C, de características también muy similares al R-22, para ser usado en sistemas de refrigeración. En el diseño y la evaluación de estas nuevas composiciones se han analizado las ventajas e inconvenientes que existen a nivel de capacidad frigorífica, de eficiencia energética (COP), de deslizamiento de temperatura, de PCA y la inflamabilidad. Presentamos algunas comparaciones de estas composiciones a partir de modelos informáticos. Las nuevas composiciones han sido evaluadas con modelos de ciclo termodinámico en condiciones estándar de climatización, así como en condiciones de funcionamiento a alta temperatura ambiente, y muestran un buen rendimiento. En la actualidad se están haciendo pruebas para evaluar el rendimiento de estas nuevas composiciones en equipo de laboratorio y en sistemas operativos reales, en comparación con el rendimiento del R-410A o R-22 en sistemas similares. El estado de las pruebas se documenta en este trabajo. Estas nuevas composiciones proporcionan opciones útiles para ayudar a mantener la calidad de vida y los beneficios para la salud que se derivan del uso del aire acondicionado y de la refrigeración, pero en una forma eficiente energéticamente y ambientalmente sostenible.

Para aplicaciones de refrigeración existentes, o de nueva implantación, donde se utiliza el R-404A, se han investigado dos soluciones. La primera es una mezcla alternativa al R-404A con el PCA más bajo posible (PCA ~1400) y no inflamable, el R-449A. Esto es deseable en grandes sistemas de supermercado o industriales, para sustitución rápida, cómoda y económica de sistemas existentes de R-404A que fueron diseñados para refrigerantes no

inflamables. Otro producto ya introducido es el R-452A, de aplicación más específica en pequeños compresores herméticos de R-404A, donde se nos exigen pequeñas diferencias con el mismo. La tercera alternativa consiste en buscar el PCA más bajo (~250), con inflamabilidad media y que cumpla la clasificación ASHRAE A2L, sería el producto denominado R-454A. Este sería adecuado para nuevos sistemas en los que se pueda permitir un bajo nivel de inflamabilidad con tamaños más pequeños de carga de refrigerante y con un PCA algo superior a 150.

El R-449A y el R-454A serán evaluados en un análisis de ciclo termodinámico y por medio de ensayos experimentales en un armario congelador autónomo y en una unidad condensadora. Se medirán diversos parámetros en comparación a la base del R-404A, incluido el consumo de energía, las presiones y temperaturas y el índice de flujo másico. Además, se presentarán datos reales, relativos a consumo energético, de sustituciones realizadas en equipos existentes de R-404A para el caso del R-449A.

2. MEZCLAS HFO CON PCA BAJO Y MUY BAJO PARA SUSTITUCIÓN DE R22 Y R-410A

El diseño de mezclas de refrigerante viables puede ser un reto. ASHRAE Standard 34 enumera más de cien mezclas refrigerantes zeotrópicas, y más de una docena de mezclas refrigerantes azeotrópicas que han sido remitidas para clasificación de seguridad y designación. Algunas de estas mezclas refrigerantes han mostrado ser útiles para la industria y muchas no han tenido una aceptación comercial amplia. Esto ilustra el hecho de que crear una composición refrigerante que sea realmente útil para la industria de refrigeración no es trivial. Moléculas distintas pueden interactuar entre ellas en formas inesperadas a veces para formar mezclas que muestran grados variables de un comportamiento no ideal para la solución. Los modelos de mezcla simple que asumen propiedades ideales de mezcla pueden arrojar resultados inesperados e imprecisos.

Una simple observación de las moléculas enumeradas en la Tabla I muestra que el punto de ebullición, valor PCA y propiedades de inflamabilidad pueden variar ampliamente entre una familia de, por ejemplo, dos moléculas y tres moléculas de carbono similares. Parecería fácil seleccionar ingredientes con puntos de ebullición similares, similares grados de inflamabilidad y valores PCA próximos para mezclar. No obstante, al analizar la tabla, se muestra que tales propiedades, como un PCA bajo, no inflamabilidad y bajos puntos de ebullición son a menudo excluyentes. Es difícil seleccionar ingredientes para conformar una mezcla que encaje en el punto de ebullición de, digamos, el R-22, a $-40,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, mantener un bajo PCA, y que no sea inflamable. Si se encuentra un candidato con bajo PCA, las fórmulas pueden ser inflamables o poseer un alto deslizamiento de temperatura. Si se añade a eso la necesidad de aproximarse a la temperatura crítica y las prestaciones del R-22 como refrigerante, se hace aún más difícil. Parece necesario llegar a un compromiso y un equilibrio de propiedades. El reto es minimizar los efectos negativos al tiempo que se maximizan las propiedades deseables.

Modelar el rendimiento de las mezclas sólo producirá resultados fiables si se emplean parámetros de interacción binaria seguros y las técnicas adecuadas de modelado de mezcla. Estamos trabajando para desarrollar una nueva familia de composiciones refrigerantes que

utilizan ingredientes de bajo PCA, que incluyen moléculas HFO, para lograr un grado más elevado de sostenibilidad medioambiental. En nuestro laboratorio, la práctica estándar comienza midiendo muchas propiedades, incluidos los coeficientes de interacción para todos los pares binarios dados de las mezclas. Además, se han desarrollado técnicas de modelado de orden elevado y se han validado para facilitar un modelado fiable de mezclas candidatas. Los resultados modelados son en último término validados por ensayos de equipos para determinar los impactos de las características de caída de presión y de transferencia de calor de las mezclas refrigerantes candidatas, así como el consumo de energía por parte del compresor. Los resultados de esta ponencia se basan en este modelado termodinámico. Se necesitan en último término combinaciones de R-32, R-125, R-134a, R-1234yf, y, en algunos casos, otros HFO y otros HFC. Los candidatos refrigerantes han sido remitidos a AREP o PRAHA y otros programas de ensayos de fabricantes de equipos originales para lograr un análisis final de la utilidad de la mezcla refrigerante en su conjunto.

Tabla I. *Propiedades de ingredientes hidrocarburos y fluorados de mezclas refrigerantes “ * ” indica clasificación prevista*

Número de Refrigerante	Denominación química	Punto de ebullición en °C	PCA directo (AR5)	Clase de Inflamabilidad (ASHRAE/ISO)
R-32	Difluorometano	-51.7	677	A 2L
R-116	Hexafluoroetano	-78.2	11100	A 1
R-125	Pentafluoroetano	-48.1	3170	A 1
R-134a	1,1,1,2-tetrafluoroetano	-26.1	1300	A 1
R-143a	1,1,2-trifluoroetano	-47.5	4800	A 2
R-152a	1,1,difluoroetano	-27	138	A 2
R-161	Monofluoroetano	-37.6	4	A 3*
R-170	Etano	-89	5.5	A 3
R-218	octafluoropropano	-36.8	8900	A 1
R-227ea	1,1,1,2,3,3,3-heptafluoropropano	-16	3350	A 1
R-236fa	1,1,1,3,3,3-hexafluoropropano	-1.4	8060	A 1
R-245fa	1,1,3,3,3-pentafluoropropano	14.9	858	B 1
R-290	Propano	-42.1	3.3	A 3
R-1234yf	2,3,3,3-tetrofluoropropene	-29.4	<1	A 2L
R-1234zeE	1,3,3,3-tetrafluoropropene	-19	<1	A 2L
HC-600	n-butano	-0.5	4	A 3
HFO-1336mzz	1,1,1,4,4,4-hexafluorobuteno	33.4	2	A 1*

2.1. Mezclas refrigerantes a base de HFO

Ya hay mezclas de refrigerante a base de HFO que se están comercializando para reemplazar a los gases de muy elevado PCA. En la Tabla II se resume una amplia gama de refrigerantes candidatos de PCA reducido para climatización, junto con la comparación referida al refrigerante que cada uno busca reemplazar. Se ha de notar que los valores de PCA que se muestran se basan en los datos recientemente emitidos desde el Quinto Informe de Evaluación (AR5) del IPCC. Esta tabla se amplía para mostrar los candidatos a sustituir al R-134a, que se utiliza en algunas bombas de calor y equipos de refrigeración, debido a su mayor temperatura crítica. La mayor temperatura crítica facilita el uso del refrigerante en

regiones de elevada temperatura ambiente de funcionamiento, donde se utilizan ampliamente en grandes enfriadoras con compresores centrífugos o de tornillo. Se muestra también el R-123, que es un fluido HCFC de baja presión de uso en enfriadoras centrífugas debido al elevado COP que se puede conseguir con estas máquinas. El HFO-1336 no inflamable y las composiciones basadas en HFO-1336 están siendo evaluados para su uso en enfriadoras y bombas de calor para sistemas de gran escala comerciales e industriales. Obsérvese que los candidatos de PCA reducido se clasifican en dos categorías, no inflamable - ASHRAE Clase 1 – y ligeramente inflamable – ASHRAE Clase 2L. Para conseguir la no inflamabilidad y los niveles de capacidad del R-22, la composición DR-91 posee un PCA mayor, pero sigue siendo inferior a 900. Para cumplir con el límite de PCA de 150 y conservar capacidad del nivel del R-22, se propone el refrigerante R-454C, el cual presentará la clasificación ASHRAE 2L por su ligera inflamabilidad.

Tabla II. Comparación de propiedades de candidatos para aire acondicionado

Refrigerante Actual	PCA (AR5)	Candidatos de menor PCA para aire acondicionado			
		No inflamable (ASHRAE Clase 1)		Inflamabilidad media (ASHRAE Clase 2L)	
		Denominación	PCA	Denominación	PCA
R-134a	1300	R-513A	573	HFO-1234yf	1
R-22	1760	DR-91	<870	R-454C	146
R-410A	1924	----	----	R-454B	460
R-410A	1924			R-452B	676
R-123	79	HFO-1336 - R-514A	2	----	----

Para mayor claridad, los fluidos para aplicaciones domésticas y comerciales de climatización que se están evaluando se destacan en la Tabla III, en la que se comparan a los refrigerantes que buscan reemplazar. El R-32 está en una categoría ligeramente diferente, ya que utiliza tecnología para mitigar la más alta temperatura de descarga, así como lubricantes especiales para compensar su solubilidad inferior en lubricantes convencionales de tipo POE. Los refrigerantes de las Tablas II y III no precisan estas consideraciones y utilizan los mismos lubricantes y materiales de construcción y técnicas que los refrigerantes convencionales HFC. Con cualquiera de estos sustitutos, especialmente con el objetivo de evaluarlos, puede precisarse ajustar la velocidad del compresor, o seleccionar un compresor con un desplazamiento ligeramente diferente para adaptar con exactitud la capacidad volumétrica del sistema anterior para ensayos comparativos. En muchos casos, puede no ser importante que la capacidad del nuevo sistema sea exactamente la misma que las capacidades del antiguo, pero la comparación de la eficiencia energética de conjunto se hace más fácil al llevar a cabo un sistema de ensayo en un nivel de capacidad que iguale el sistema de base del anterior.

2.2. Comparación de rendimiento respecto a R-22 y R-410A

En la Figura 1 se muestra el diagrama de Presión Entalpía (diagrama PH) para R-22, superpuesto a los que han sido desarrollados para los dos sustitutos del R-22, el R-454C y el DR-91.

Tabla III. Candidato para pequeños equipos de refrigeración comercial

Refrigerante	Sustituye a	Inflamabilidad	PCA
R-454C	R-22	Si – 2L	146

Con estos diagramas, se puede ver que los anchos en la zona bifásica son sólo algo inferiores a los del R-22, lo que es consistente con las pequeñas variaciones en la capacidad volumétrica relativa, tal como se enumera en los resultados del cálculo de ciclo, mostrados en la Tabla IV. Los diagramas PH ilustran también que las presiones críticas de R-454C (DR-3) y DR-91 están próximas a las de R-22. Comparaciones similares se han hecho para R-410A, R-454B y R-452B.

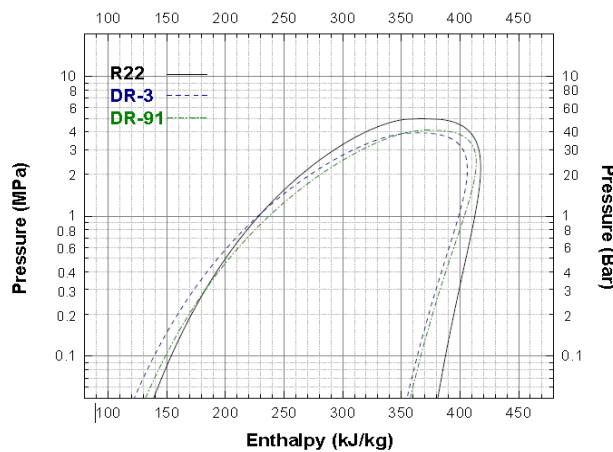


Figura 1. Diagrama PH comparativo respecto a R-22

Se ha empleado un análisis de modelado termodinámico para demostrar el COP relativo y la capacidad de estas composiciones de fluidos refrigerantes. Las condiciones de ciclo para los resultados de la Tabla IV son los siguientes:

Evaporador: 7 °C, Condensador: 47 °C, Eficiencia del compresor: 70 %, Líquido de subenfriamiento: 10 K, Sobrecalentamiento del evaporador: 5 K

Todos los resultados están normalizados con referencia al R-22, ya que hay mucho interés en numerosas regiones de clima cálido en la sustitución del R-22, especialmente si se puede identificar un gas refrigerante no inflamable adecuado. DR-91 ha sido desarrollado para abordar esta necesidad de no inflamabilidad. Las temperaturas críticas (T_{cr}) de los diversos refrigerantes se anotan en la última línea de la Tabla IV. La relativamente elevada T_{cr} , añadida al perfil de su diagrama PH puede explicar cómo el R-22 puede mantener un rendimiento satisfactorio en condiciones de clima cálido en comparación al R-410A. El R-407C se incluyó para referencia en las comparaciones por su ODP cero y por ser un refrigerante no inflamable también ampliamente utilizado en climatización.

Tabla IV. Comparaciones detalladas de candidatos para sustitución frente al R-22

Propiedad	R-22	R-407C	R-454C	DR-91	R-410A	R-454B	R-32
PCA (IPCC AR5)	1760	1624	146	870	1924	465	677
Clase de inflamabilidad	1	1	2L	1	1	2L	2L
Capacidad frente a R-22	---	+1.7 %	- 4.5 %	-11 %	+45 %	+42 %	+59 %
COP vs. R-22	---	-2 %	-2 %	-1 %	-6 %	-5 %	-6 %
Deslizamiento, Kelvin	0	7	7	4.2	<0.2	1.5	0
Temp. Descarga °C	83	75	69	67	81	87	103
Temp. Crítica °C	96.1	86	82.5	86	71.3	76.5	78.1

Las temperaturas críticas relativamente elevadas de los candidatos a reemplazar al R-22 sugieren que el funcionamiento en condiciones de ambiente cálido puede llevarse a cabo con menor pérdida de rendimiento que la del R-410A y sus sustitutos y con un consumo energético inferior. Para ensayar esto, se llevaron a cabo modelos de ciclo en dos condiciones, condiciones típicas de climatización y condiciones de climas cálidos. Los resultados de ese análisis se muestran gráficamente en la Figura 2.

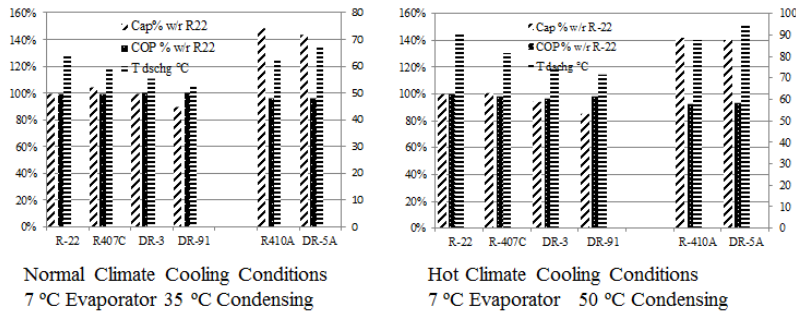


Figura 2. Resultados para condiciones normales frente a clima cálido. COP y capacidad normalizados según R-22. Temperatura en °C

2.3. Análisis

El funcionamiento de un ciclo de refrigeración en climas cálidos tiene como resultado la reducción de capacidad y del COP, y el incremento del consumo energético. El incremento de la temperatura de condensación de 35 °C a 50 °C dio como resultado la reducción de la capacidad en torno al 11 %, y la reducción del COP en torno al 40 % en el caso en que se toma al R-22 como base. No resulta muy sorprendente que las alternativas potenciales al R-22 muestren también disminución de capacidad y de COP. La mayor o menor disminución variará con las características de cada refrigerante individual. En el caso ilustrado en la Figura 2, las reducciones de capacidad para el R-410A fueron del 14,3 %, y la pérdida de COP fue el 42,3 %, la mayor de todos los refrigerantes comparados. Una de las preocupaciones en climas cálidos, y especialmente en condiciones de temperatura de descarga aún mayor, es el comportamiento del R-410A con su temperatura crítica de 71 °C, frente a los 96 °C del R-22. Al mismo tiempo, la forma más estrecha del diagrama PH del R-410A en su parte superior implica que el calor latente del cambio de fase es menor. Un objetivo para el desarrollo de un sustituto del R-22 es conservar lo más posible la eficiencia y capacidad en climas cálidos. Por esta razón, un refrigerante de sustitución debería idealmente tener una

elevada T_{cr} y una zona ancha en la parte superior de la campana de cambio de fase del diagrama PH, lo que indicaría mayor calor latente en la condensación y evaporación.

Todos los refrigerantes, tanto R-22 como R-410A, pierden rendimiento en condiciones de temperatura más elevada, pero el grado de pérdida varía según el refrigerante. No obstante, según muestran los datos en el cuadro de barras, a elevada temperatura de condensación, todos los candidatos de PCA reducido R-454C (DR-3), DR-91, y R-454B (DR-5A) poseen mayor COP que el R-410 A. Al ser la eficiencia energética el factor más importante en la reducción del impacto global en las emisiones de carbono, esto es muy significativo. La reducción de capacidad no es tan crítica ya que el uso de un compresor de mayor desplazamiento puede hacer recuperar capacidad volumétrica en un punto deseado. Dicho esto, el R-454B (DR-5A) muestra menor pérdida de capacidad en condiciones cálidas que otros candidatos, lo cual también podría dar un menor consumo energético.

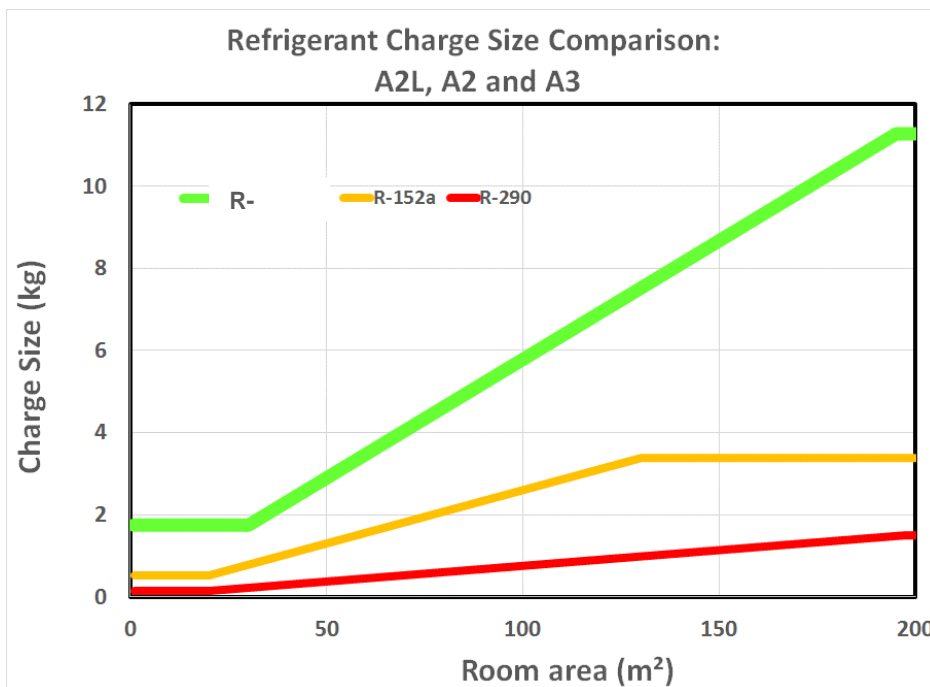
Dadas sus características, el R-454C (DR-3) también puede presentar un futuro prometedor en equipos de refrigeración herméticamente sellados dado su PCA inferior a 150, cuyo límite se marca en la F-gas a partir del año 2020.

Otra mezcla que se está evaluando, con resultados muy prometedores, es el R-452B, también clasificado 2L (con una inflamabilidad mucho menor) y con un PCA de 676 (AR5), con un comportamiento más cercano al R-410A.

2.3. Clasificación de inflamabilidad 2L

Varios de los anteriores productos presentan la clasificación de inflamabilidad 2L. La clasificación de inflamabilidad de los fluidos refrigerantes ha sido hasta ahora en tres categorías: 1- No inflamable, 2- Medianamente inflamable y 3- Muy inflamable. Con la llegada de productos con un rating de inflamabilidad situado entre 1 y 2 se ha tenido que habilitar una nueva clasificación para poder incluir dichos productos ligeramente inflamables. Estos productos a caballo entre las clasificaciones 1 y 2 son los denominados 2L. Esta nueva clasificación ya está incluida en ASHRAE-34, como ya hemos comentado anteriormente, y en la ISO 817:2014 y se ha procedido a su inclusión en la normativa EN378, aprobada a primeros de 2017 y pasada a los diferentes países para su publicación. En esta nueva clasificación se incluyen la mayoría de nuevas moléculas de tipo HFO y algunos HFC utilizados en nuevas mezclas (R-32) Con esta nueva clasificación se pretende clarificar las condiciones de seguridad en instalaciones frigoríficas y cubrir un mayor espectro de posibilidades en el desarrollo de nuevos sistemas.

Ejemplo de carga permitida de cada una de las clasificaciones según superficie de ventas, según revisión Norma EN378:



R-454A = A2L
R-152a = A2
R-290 = A3

3. MEZCLAS HFO DE PCA REDUCIDO PARA SUSTITUCIÓN DE R-404A

La sustitución de los HFC's en el sector de la refrigeración supone un mayor reto dada la elevada dependencia en este sector de refrigerantes con alto PCA, tales como el R-404A y el R-507A (en 2015 suponían aproximadamente un 42,2 % del total de HFC's puestos en el mercado europeo). Para ello se han desarrollado varios refrigerantes que aspiran a ofrecer prestaciones similares al R-404A. El primero, el R-449A, ha sido formulado para que no sea inflamable (ASTM E681-04 2004 y ASHRAE norma 34-2010), con un PCA en torno a 1300, aproximadamente un 65% inferior al R-404A. Su PCA es también inferior al de otras alternativas al R-404A, como el R-407A (36% menor) y el R-407F (23% menor). Esto lo hace muy interesante para sustitución en equipos existentes con mínimas modificaciones y para la fabricación de nuevos sistemas bajo la normativa F-Gas II. El R-452A (con un PCA de 1945) se desarrolló originalmente para sistemas de frío transporte donde hay más exigencias a la hora de sustituir el R-404A, pero dadas sus características muy similares al R-404A se utiliza también en sistemas con compresores herméticos de bajas potencias a baja temperatura; en estos sistemas la temperatura de descarga es un factor muy importante a tener en cuenta, y el R-452A proporciona la temperatura de descarga más baja respecto al R-404A. El R-454A, posee un PCA en torno a 250, un 94% inferior al del R-404A. Posee inflamabilidad media (ASTM E681-04 2004) y puede por ello tener limitaciones para su uso en sistemas de carga mayores. Necesita modificaciones respecto al sistema de R-404A, con lo que es más indicado para equipos nuevos.

Se han evaluado las prestaciones del R-449A y del R454A en un armario congelador; el R-449A ha sido también ensayado en una unidad condensadora de tipo partido, ambos diseñados originariamente para R-404A.

3.1. Propiedades y Prestaciones Termodinámicas

La comparación de propiedades termo-físicas del R-454A y R-449A con respecto al R-404A se muestran en la Tabla V, a continuación. Los puntos de ebullición son muy similares y los puntos críticos de R-454A y R-449A son más elevados que en el R-404A, lo cual es favorable en zonas cálidas. Las presiones de vapor y densidades líquidas también son similares. Las densidades de vapor de R-454A y R-449A son ligeramente inferiores a la del R-404A, lo que reducirá el índice de flujo másico.

Tabla V. *Propiedades termofísicas*

	R-404A	R-454A	R-449A
Punto de ebullición [°C]	-47	-48	-46
Punto crítico [°C]	72	81	82
Presión de vapor a 25°C [kPa]	1254	1372	1271
Densidad de líquido a 25°C [kg/m ³]	1044	1133	1139
Densidad de vapor a 25°C [kg/m ³]	65,3	46,8	48,9

Para evaluar las prestaciones de enfriado termodinámico, se realizó el modelo del ciclo para R-454A y R-449A comparándolo con el R-404A. Se eligieron condiciones similares a las del sistema en el armario congelador a 32°C de temperatura ambiente: Temperatura de evaporador = -26°C, temperatura de condensador = 43°C, subenfriamiento = 14K, temperatura de succión = -4°C y eficiencia isentrópica del compresor = 75%. Los resultados se muestran en la Tabla VI.

Tabla VI. *Prestaciones del ciclo termodinámico*

Refrigerante	Presión de succión [kPa]	Presión de descarga [kPa]	Ratio de comp.	Temp. descarga compresor [°C]	Deslizamiento temp. [K] (Media evap. y condens.)	Capacidad vol. [kJ/m³]	Capacidad ad relativa a R-404A [%]	COP	COP relat. a R-404A [%]
R-404A	242	1969	8,1	86	0,4	1442	100	2,03	100
R-454A	230	1987	8,6	107	5,7	1488	103	2,05	101
R-449A	207	1869	9,0	103	4,3	1372	95	2,07	102

Tanto R-454A como R-449A muestran ratios de compresión y presiones comparables a los de R-404A. Ambos poseen deslizamientos de temperatura mayores que el R-404A, pero comparables a algunos refrigerantes comerciales que se utilizan en la actualidad, en torno a 4,5 K. Las temperaturas de descarga del compresor también son algo mayores que las del R-404A; no obstante, la capacidad frigorífica y la eficiencia energética son casi parejas a la del R-404A (un poco superior en el caso del R-449A).

3.2. Ensayo de sistema de armario congelador

Para medir las prestaciones de sistema de R-454A y R-449A en un sistema, se seleccionó un armario congelador (Fig. 3) con todos sus instrumentos y situado en un cuarto de temperatura

constante. El congelador es una unidad de doble puerta de 1,5 m³ diseñada para R-404A, con carga de refrigerante de 1,15 kg. Posee un compresor de pistón que utiliza un lubricante de polioléster (POE) de 32 centistokes. Se estableció un ensayo que se adaptara lo más posible a la norma AHAM HRF-1-2008 sobre Energía y Volumen Interno de Dispositivos de Refrigeración (AHAM 2008). No fue posible utilizar la norma 72 de ANSI/ASHRAE porque no se había establecido un sistema para que las puertas del congelador se abrieran y cerraran durante el ensayo. El armario congelador se controla con dos válvulas de expansión termostáticas.



Figura 3. Foto del armario congelador de R-404A utilizado en el ensayo experimental

El congelador vacío (según AHAM HRF-1-2008) se situó en una sala de temperatura constante y plenamente equipado con sistemas de medida de temperaturas (T), presiones (P), índice de flujo másico (M) y energía (W), según se muestra en la Figura 4. No se requirió control de humedad en la cámara (según la sección 5.3.2 de la norma). Los ensayos en cada condición para cada refrigerante se repitieron tres veces para garantizar que los resultados se reproducían y que ninguna variación de humedad afectaba a los resultados.

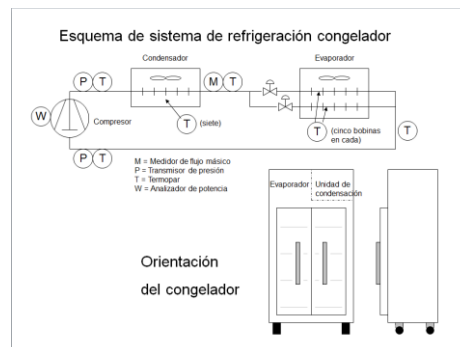


Figura 4. Esquema de la instrumentación del armario congelador

Se llevaron a cabo ensayos en tres condiciones ambientales según establece la norma, a 32°C, a 24°C y a 21°C. Primero se hizo un ensayo de referencia con el R-404A con las tres condiciones ambientales. En cada una, el sobrecalentamiento del evaporador se controló ajustando la válvula de expansión a 3-4K. El sobrecalentamiento en la evaporación se calculó desde la presión de succión y la lectura de temperatura a la salida del evaporador. La

temperatura media en el interior del compartimento del congelador (media de cuatro lecturas del termopar situadas en todo el compartimento del congelador) se controló a -17°C . Se diseñó un ciclo del compresor que permitiera mantener el conjunto de la cabina a una temperatura punta. Las temperaturas y presiones se dan como media sólo cuando el compresor estaba en funcionamiento. Tras el ensayo, se sustituyó el R404A por R-454A y después por R-449A. En cada ensayo, se eliminó el lubricante del sistema y se añadió una nueva carga del mismo tipo de lubricante POE. No se hicieron otros cambios, salvo el ajuste del sobrecalentamiento del evaporador con la válvula de expansión para que se igualara a las condiciones de sobrecalentamiento del R-404A. Para los dos refrigerantes, se cerraron una vuelta las válvulas de expansión. Los resultados en estado estable se muestran en la Tabla VII.

Tabla VII. Resultados del ensayo en estado estable del armario congelador

	Consumo energía [kWh/día]	Consumo energía con respect a R-404A	Sobrecalentamiento [K]	Índice flujo másico [kg/h]	Presión de succión [kPa]	Presión de descarga [kPa]	Ratio compr.	Temp. descarga compr. [$^{\circ}\text{C}$]
Temp ambiente 32°C								
R-404A	33,46	100%	4	44	211	2027	10	90
R-454A	30,81	92%	3	34	191	2133	11	105
R-449A	32,16	96%	4	30	172	1931	11	104
Temp ambiente 24°C								
R-404A	25,11	100%	3	46	198	1647	8	75
R-454A	23,91	95%	4	35	184	1728	9	91
R-449A	25,00	100%	3	31	172	1551	9	88
Temp ambiente 21°C								
R-404A	23,39	100%	3	48	199	1558	8	70
R-454A	22,62	97%	3	36	179	1600	9	85
R-449A	23,41	100%	3	33	172	1448	8	83

Los resultados experimentales en el congelador de acceso directo muestran que R-454A y R-449A presentan prestaciones similares en comparación con el R-404A, demostrando ambos una mejora de eficiencia energética en condiciones ambientales de temperatura más elevadas. El R-454A consumió un 8% menos de energía a temperatura ambiente de 32°C y el R-449A un 4% menos de energía. En condiciones ambientales inferiores, el R-454A siguió mostrando una mejora de eficiencia de 3-5%, mientras que el R-449A era equivalente al R-404A. El índice de flujo másico fue ligeramente inferior y la temperatura de descarga ligeramente superior. No obstante, las temperaturas de descarga fueron todavía suficientemente bajas como para no precisar la inyección de líquido que se necesita habitualmente en temperaturas mayores de 125°C . El sobrecalentamiento del evaporador y los índices de compresión para ambos refrigerantes también fueron similares a los del R-404A.

3.3. Ensayo de mostrador frigorífico con unidad externa de condensación

Para comparar las prestaciones de sistema del R-449A en un sistema con R-404A se seleccionó una unidad de condensación de tipo partido con un mostrador frigorífico alimentario de 2,5m. Ambos completamente equipados y situados en dos cuartos a temperatura constante, el mostrador en una habitación interna (Fig. 5) y la unidad de condensación en una exterior (Fig. 6). El mostrador se cargó por completo con simuladores de alimentos.

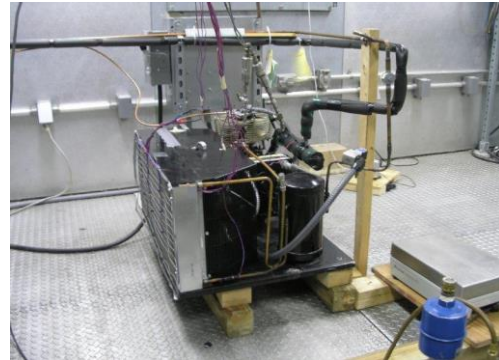
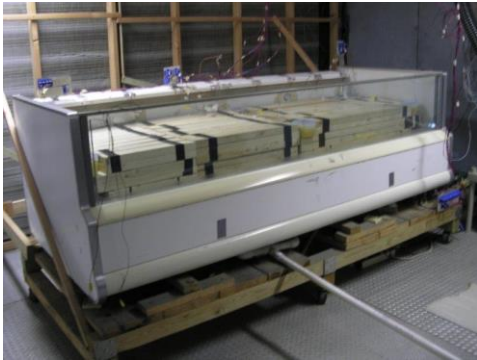


Figura 5. Mostrador frigorífico en habitación interior **Figura 6.** Unidad de condensación en cuarto exterior

El sistema, diseñado para R-404A, se cargó con 3,8 kg, y la carga de R-449A se ajustó ligeramente según la densidad del líquido. La unidad de condensación tiene compresor de pistón que utiliza un lubricante polioléster (POE) de 32 centistokes. Se elaboró un ensayo que cumpliera la norma ASHRAE 72-2005. Se llevaron a cabo ensayos a dos temperaturas ambiente en la habitación exterior, 35°C y 28°C, con la habitación interior siempre a 24°C. Se ensayó primero como base el R-404A en las dos condiciones ambientales a temperaturas baja y media. Tras el ensayo, se sustituyó R404A por R-449A. En cada ensayo, el sistema se vació de lubricante y se le añadió una nueva carga de lubricante POE del mismo tipo. No se hicieron otros cambios en el sistema, excepto ajustar el sobrecalentamiento del evaporador con la válvula de expansión para igualar condiciones de sobrecalentamiento del R-404A. Para el R-449A, el ajuste de la válvula de expansión estuvo próximo a 1,6 vueltas. Se muestran los resultados de estado estable para baja temperatura en la Tabla VIII a y para las condiciones a temperatura media en la Tabla VIII b.

Tabla VIII a. Resultados de ensayo a baja temperatura del caso de mostrador/unidad de condensación

	Consumo energía con respecto a 404A [%]	Índice Flujo másico [kg/h]	Presión de succión [kPa]	Presión de descarga [kPa]	Ratio Comp.	Temp media de alimentos [°C]	Temp descarga compresor [°C]
Temp ambiente = 28°C							
R-404A	100	32	112	1438	12,8	-17	78
R-449A	97	26	104	1407	13,5	-17	83
Temp ambiente = 35°C							
R-404A	100	33	127	1722	13,6	-16	87
R-449A	96	26	115	1685	14,6	-15	92

Tabla VIII b. Resultados de ensayo a temperatura media del mostrador/unidad de condensación

	Consumo energía con respecto a 404A [%]	Índice Flujo másico [kg/h]	Presión de succión [kPa]	Presión de descarga [kPa]	Ratio Comp.	Temp media de alimentos [°C]	Temp descarga compresor [°C]
Temp ambiente = 28°C							
R-404A	100	38	262	1544	5,9	2,2	72
R-449A	92	32	262	1496	5,7	2,2	75
Temp ambiente = 35°C							
R-404A	100	41	248	1827	7,4	2,2	82
R-449A	88	34	283	1792	6,3	2,8	84

Los resultados experimentales para la unidad de condensación con mostrador frigorífico muestran que el R-449A presenta prestaciones similares en comparación con el R-404A, en condiciones de temperatura baja y media, demostrando ambos mejor eficiencia energética, especialmente en condiciones ambientales más elevadas. Los resultados de ensayo muestran que el R-449A consumió un 3-4% menos de energía en temperatura baja y un 8-12% en temperatura media. La presión de succión fue en ambos casos similar a la del R-404A y la presión de descarga inferior en ambas condiciones. El índice de flujo másico fue ligeramente inferior y la temperatura de descarga ligeramente superior. No obstante, las temperaturas de descarga del R-449A se mantuvieron suficientemente bajas como para que no precisara una inyección de líquido que se precisa normalmente en temperaturas superiores a 125°C. Los ratios de sobrecalentamiento del evaporador y compresión fueron también similares a los del R-404A.

3.4. Caso real reconversión supermercado de R-404A a R-449A

A continuación, se muestran resultados reales obtenidos en la reconversión de un sistema R-404A a R-449A en un supermercado existente situado en Bélgica. El sistema se compone de dos centrales de frío positivo, cada una de ellas con dos compresores Bitzer 4J-22.2Y (35 kW). La primera central A tiene una carga máxima prevista de 46 kW y la central B de 73

kW. La central de frío negativo utiliza 3 compresores Bitzer 4NCS-12.2Y (8,63 kW) con ventilación adicional y una carga máxima prevista de 24 kW. El sistema consta de 47 servicios de refrigeración (35 frío positivo y 12 frío negativo) con 10 cámaras frías (8 FP, 2 FN). Todas las cámaras usan válvulas de expansión termostáticas de Danfoss.



Figura 7. Centrales de frío supermercado belga

El trabajo de cambio de refrigerante fue realizado en apenas unas horas y sólo necesitó de un ajuste del sobrecalentamiento de las válvulas termostáticas (cerrando las mismas), manteniendo todos los componentes de la instalación de R-404A, incluso el aceite original de la misma. La reconversión se realizó de manera rápida y sencilla.

Los resultados medidos de consumo eléctrico son los mostrados en la figura 8. En ellos podemos ver datos comparativos de consumo eléctrico tanto de las centrales de temperatura positiva como de la de temperatura negativa. En el caso de las centrales de positiva obtenemos un ahorro energético hasta de un 8,5%, y en el caso de la central de negativa obtenemos un ahorro de hasta un 2,5%, del R-449A respecto al R-404A.

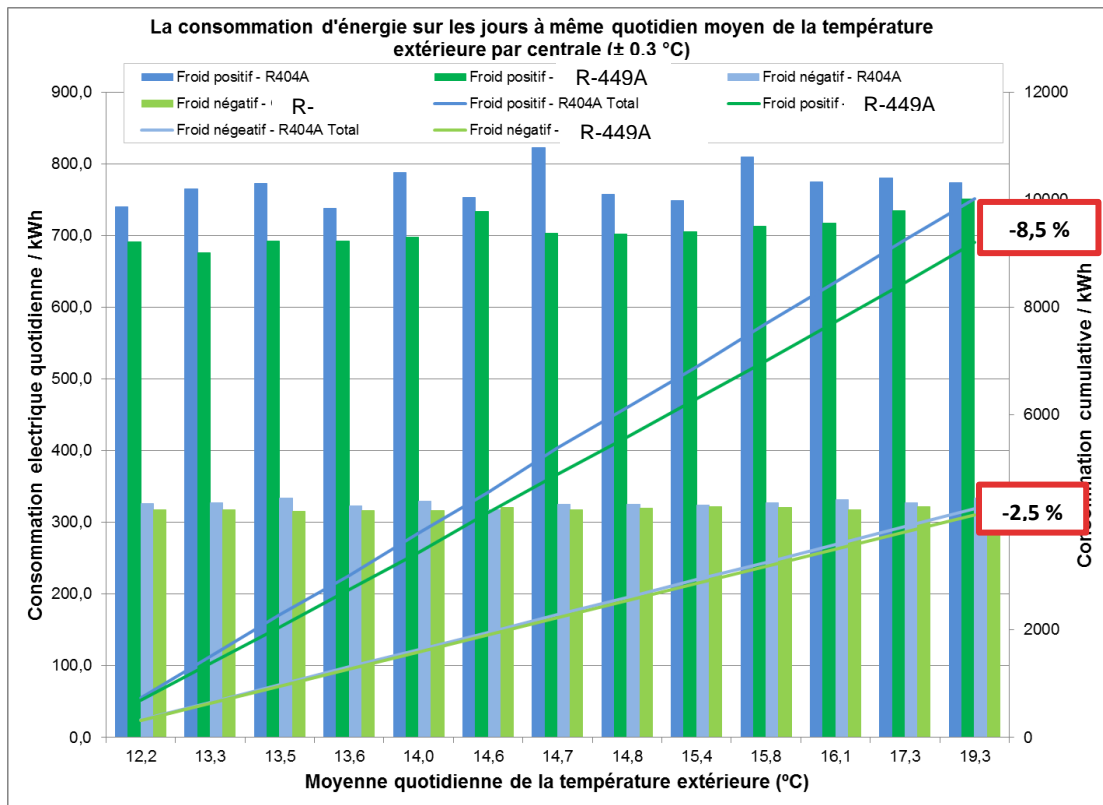


Figura 8. Datos de consumo eléctrico real comparados

Como ya se ha comentado, para la sustitución del R-404A en equipos existente y en equipos nuevos, también se trabaja en el R-452A, producto clasificado A1, con un PCA de 1945 (AR5) cuya principal característica es una temperatura de descarga similar al R-404A, lo cual lo hace muy interesante para equipos con compresores herméticos pequeños y sistemas de refrigeración de transporte. En estos sistemas temperaturas de descarga alta influyen considerablemente en el rendimiento y durabilidad de los compresores.

4. CONCLUSIONES

Existen ya refrigerantes alternativos con bajo y muy bajo PCA para sustituir los refrigerantes utilizados habitualmente en climatización y refrigeración. En algunos casos resultados óptimos de rendimiento de las instalaciones requerirán optimización de los equipos por parte de los fabricantes, otros una simple reconversión. La legislación medioambiental, la mejora en la eficiencia energética y las normas sobre inflamabilidad siguen siendo claves para la selección de los refrigerantes que se utilizarán en el futuro

Se han descrito algunas consideraciones del proceso por el cual se desarrolla una composición refrigerante para aire acondicionado. Se han mostrado composiciones refrigerantes con propiedades adecuadas para su uso en climas cálidos. Se han destacado las

propiedades físicas y los resultados del modelado de ciclo. Utilizando un proceso de desarrollo detallado, se ha desarrollado un conjunto de composiciones de PCA reducido para su uso en nuevos sistemas de aire acondicionado y refrigeración que son similares a los actuales diseños comerciales de climatización, bombas de calor y sistemas de refrigeración. Se desarrollaron dos candidatos para su uso en sistemas de aire acondicionado diseñados para R-22 y se ha desarrollado una composición independiente para su uso en sistemas optimizados para su uso con R-410A.

Uno de los sustitutos descritos para R-22 (DR-91) no es inflamable y posee eficiencia energética muy próxima a la del R-22. Su moderado deslizamiento de temperatura lo hace adecuado para su uso en sistemas convencionales con evaporadores y condensadores de expansión directa. La capacidad frigorífica volumétrica está en torno al 11 % menor que la del R-22, por lo que se pueden lograr rendimientos similares utilizando un compresor de velocidad ligeramente superior o un compresor con un desplazamiento un poco mayor. El otro sustituto descrito para el R-22 (R-454C) está optimizado para cumplir límites de PCA directo aún más severos de 150. Este candidato posee una capacidad próxima a la del R-22, pero es ligeramente inflamable (ISO/ASHRAE Clase 2L). Otros refrigerantes (R454B y R-452B) suponen una mejora sobre el anterior refrigerante de desarrollo, como candidatos para su uso en sistemas de mayor capacidad tipo R-410A.

Así mismo se han desarrollado dos nuevos refrigerantes de bajo PCA que pueden sustituir al R-404A en refrigeración comercial. El primero, el R-454A, posee un PCA en torno a 250, que es un 94% inferior al del R-404A. Presenta un nivel de inflamabilidad bajo (2L) y puede por eso tener algunas limitaciones para su utilización en sistemas de mayor carga de refrigerante, no siendo apto para sustitución directa en sistemas diseñados para refrigerantes de tipo 1. Sin embargo, sería adecuado para sistemas de unidad de un solo condensador y para refrigeradores congeladores individuales adaptados a refrigerantes de tipo 2L. El R-449A se ha formulado para que no sea inflamable, con un PCA de uno 1282, aproximadamente un 65% menor que el R-404A. Es adecuado para sistemas grandes nuevos de estantes y otras unidades de refrigeración en las que el uso de refrigerantes inflamables no se desea o está limitado. Es también un refrigerante adecuado para la reconversión de sistemas existentes. Las prestaciones de ambos se han evaluado en un armario congelador y el R-449A en una unidad de condensación separada con un mostrador frigorífico, diseñados originariamente para R-404A. Los únicos cambios que se han hecho al sistema han sido un ajuste de la válvula de expansión para hacer la comparación en condiciones de igualdad de sobrecalentamiento en el evaporador. En conjunto, el consumo de energía de ambos refrigerantes es, como mínimo, equivalente al del R-404A, mientras que mantienen similares otros parámetros. En el armario frigorífico en condiciones ambientales mayores, R-449A y R-454A mostraron un consumo de energía menor en un 4 y 8%, respectivamente. Los resultados de los ensayos de la unidad de condensación con el R-449A mostraron un consumo de energía inferior en un 3% en temperatura baja y una mejora de hasta 8-12% frente al R-404A en condiciones de temperatura media. También hemos podido constatar el menor consumo energético en la reconversión de una instalación real existente. El uso de estos refrigerantes de bajo PCA puede proporcionar una respuesta inmediata y eficaz para reducir el impacto medioambiental de los sistemas de refrigeración, permitiendo a la vez una reconversión con cambios mínimos de los sistemas de R-404A existentes. El R-449A está ya siendo utilizado en multitud de sistemas comerciales para disminuir el PCA directo de los

mismos, consiguiendo además ahorros energéticos en prácticamente todos los casos. Notar también el R-452A para los casos específicos enumerados anteriormente. Donde cualquier otro sustituto no nos da el resultado esperado.

En el caso del R-134a, tanto en instalaciones de climatización como de refrigeración, hay también soluciones de tipo A1, el R-513A, y de tipo A2L, el HFO-1234yf. Ambas presentes ya en muchas instalaciones comerciales (por ejemplo: automoción, enfriadoras, sistemas en cascada...). Al igual que en el caso del R-404A, en la mayoría de los casos los cambios son mínimos y los resultados satisfactorios.

5. AGRADECIMIENTOS

El autor desea agradecer a Chemours Spain, S.L. y a DuPont Chemicals and Fluoroproducts Refrigerants, su apoyo a este trabajo de investigación y desarrollo y que hayan concedido permiso para presentar este trabajo.

6. REFERENCIAS

ALLGOOD, C. et al. 2014, Long Term Viability of HFO-1234yf in Stationary Refrigeration Systems – Multi-Year Evaluation of Refrigerant, Lubricant, and Compressor Performance in a Domestic Freezer, Accepted manuscript #269, *International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue University*, West Lafayette, IN.

BIVENS, D. et al. 1997, “Performance of R-32/R-125/R-134a Mixtures in systems...”, *ASHRAE Transactions* PH-97-9-4.

HYDUTSKY, B., et al. 2014, Thermal Stability Studies to Evaluate Low PCA Refrigerants, *ASHRAE Seminar 34*, New York

LECK, T.J., 2010, “New High Performance, Low PCA Refrigerants...”, *Proc. 2010 Int’l Refrigeration Conference at Purdue University*, West Lafayette, IN, USA

LECK, T.J. y YAMAGUCHI, Y. 2010, Development and Evaluation of Reduced PCA AC and Heating Fluids, Proc. *JRAIA Int’l Symposium*, Kobe, Japan.

LECK, T.J. y HYDUTSKY, B., 2012, Laboratory Studies of Stability of Low PCA Refrigerants: I, Proc. *JRAIA Int’l Symposium*, Kobe

LEMMON, E.W. et al. 2007, REFPROP Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties, *NIST Standard Reference Database 23, Version 8.0*, National Institute of Science and Technology, Boulder, CO, USA.

MINOR, B.H. y LECK, T.J., “Low PCA Refrigerant Technology Update” Proc. *JRAIA Int’l Conference*, Kobe, 2008

NIELSON, O.J. et al. 2007. Atmospheric Chemistry of $\text{CF}_3\text{CF}=\text{CH}_2$: Kinetics and mechanisms of gas-phase reactions with Cl atoms, OH radicals and O_3 . Chemical Physics Letters, 439 (2007):18-22.

7. EXENCIÓN DE RESPONSABILIDADES

La información aquí mencionada se suministra sin cargo alguno y se basa en datos técnicos que Chemours y DuPont consideran fiables. Está destinada a personas que tienen conocimientos técnicos y bajo su propio riesgo. Ya que las condiciones de uso están fuera de nuestro control, no damos garantías expresas o implícitas ni asumimos responsabilidad relacionada con el uso de esta información. Nada de lo citado aquí puede tomarse como licencia para funcionar o como recomendación para infringir ninguna patente o aplicación de patente.