

Primera de tres entregas

Condiciones de reemplazo del R-22

El siguiente paso en la transición a refrigerantes ambientalmente más seguros es la eliminación gradual del R-22, que es el refrigerante de mayor uso tanto en los Estados Unidos como a nivel mundial. Su rango de aplicación en sistemas residenciales, comerciales, industriales y de transporte es mayor que el de cualquier otro refrigerante.

por James M. Calm, P.E.,
Socio de ASHRAE,
y Piotr A. Domanski,
Ph.D., Miembro de ASHRAE

Desde su reconocimiento inicial en 1928 y su comercialización en 1936, el R-22 ha sido aplicado en sistemas que oscilan desde los más pequeños acondicionadores de aire de ventana hasta los más grandes congeladores y bombas de calefacción, incluyendo las de refrigeración y calefacción de distrito.

El equipo individual que utiliza este versátil refrigerante oscila entre 2 kW y 33 MW (entre 1/2 y 9.500 toneladas) de capacidad de refrigeración. El uso de R-22 incluye equipo con pistón de rodamiento rotatorio, pistón oscilante, compresores de espiral, de tornillo y centrífugo y, experimentalmente, ciclos de absorción. Ningún otro refrigerante ha logrado este rango tan amplio de capacidades comerciales o aplicaciones.

Sin embargo, el R-22 es uno de los químicos, hidroclorofluorocarbonos (HCFCs), que están siendo eliminados gradualmente para la protección ambiental, con base en un

acuerdo internacional, el Protocolo de Montreal para sustancias que agotan la capa de ozono (UNEP 1997, 2003a). Las medidas de control del protocolo se relacionan con el "consumo", definido como la producción más importaciones menos exportaciones y cantidades de calificación destruidas. El protocolo no limita el futuro uso de químicos ya fabricados o importados, especialmente el refrigerante que ya está en uso, reciclado o almacenado antes de las fechas de la eliminación gradual. Tampoco restringe el uso de químicos como inventarios de abastecimiento (intermediarios para fabricar otros químicos).

Se deben identificar las fechas de eliminación gradual para fabricación e importación del R-22 con base en el Protocolo de Montreal y los requerimientos nacionales tanto en Canadá como en los Estados Unidos. Las fechas mostradas a continuación son de eliminación total, aunque aplican las primeras etapas de reducción progresiva o suspensión. Algunos países (especialmente muchos de Europa) han acelerado la programación.



Debido a su gran uso anterior y actual, un gran inventario de equipo diseñado para el R-22 seguirá en servicio por décadas, mucho después de que haya terminado la producción de R-22. Las principales fuentes para mantener este equipo serán las concesiones limitadas de producción para dicho servicio, inventarios almacenados antes del término de la producción, y las cantidades recuperadas del equipo convertido o retirado. Existirán también opciones para convertir el equipo a refrigerantes de reemplazo, algunos de los cuales eran desarrollados específicamente para simplificar la conversión post-mercado (diferente al uso original).

Un número pequeño de países, también principalmente en Europa, tienen restricciones más fuertes. Ya han prohibido el uso del R-22 y/o su servicio, o las tendrán en fechas específicas con base en el tipo y tamaño del equipo. Por el contrario, el Protocolo de Montreal permite a los países en desarrollo (más específicamente a los identificados en el Artículo 5(1), con base en sus niveles de uso de sustancias controladas), continuar el “consumo” (producción más importaciones menos exportaciones y destrucción) hasta el año 2040.

Fechas de eliminación del R-22

Eliminación gradual de producción de R-22 (el 1º de enero del año indicado): estas fechas afectan la producción e importación de R-22, pero no la operación continuada que utiliza este compuesto existente o reciclado.

PROTOCOLO DE MONTREAL	EQUIPO NUEVO	EQUIPO EXISTENTE
Países desarrollados	2.020 a	2.030
Países incluidos en el Artículo 5(1)	2.040 a	2.040
USA y Canadá	2.010	2.020

Observaciones:

a. El Protocolo impone reducciones escalonadas (una suspensión en el año 2015 para los países incluidos en el Artículo 5.1) para el consumo colectivo de HCFC, pero permite a los países individuales determinar cómo cumplir con dichos límites con base en asignaciones entre sustancias individuales (ponderadas por sus potenciales de agotamiento del ozono, ODPs) y los usos. b. Con respecto a las Enmiendas de la Ley de Aire Limpio (CAAA) de 1990 y las normas de implementación del 40 CFR 82.

Opciones de reemplazo del R-22

No existe un refrigerante de un solo compuesto que reemplace directamente el R-22, pero los fabricantes han comercializado al menos ocho mezclas de refrigerantes para mantener el equipo existente (con conversiones apropiadas) y muchas mezclas adicionales para los nuevos equipos. Estas cantidades aumentan a más de 20 para conversiones y a más de diez para los nuevos equipos si se considera el R-502 (una mezcla ampliamente utilizada que contiene R-22 para refrigeración comercial de baja temperatura). La siguiente discusión tiene que ver con diferentes refrigerantes de un solo compuesto que reemplazan el uso del primer R-22, pero con diferencias en la forma en que son aplicados. Existen muchos refrigerantes adicionales en uso –principalmente mezclas-, pero su participación en el mercado es muy pequeña. La tabla establece solamente aquellas mezclas que han obtenido designaciones estándar.

Complementando la amplia investigación y desarrollo por parte de fabricantes individuales de químicos

y equipos, por parte de universidades y otras organizaciones de investigación, y por parte de laboratorios patrocinados por gobiernos, la industria de refrigeración y acondicionamiento de aire organizó un esfuerzo cooperativo para expedir una amplia gama de alternativas para el R-22. Este programa internacional fue conocido como el “Programa para la Evaluación de Refrigerantes Alternativos del R-22” (AREP, en inglés). Incluía un homólogo japonés identificado como JAREP. La meta del programa de prueba de principios de 1990 era eliminar la duplicación del trabajo y la pérdida de recursos limitados para evaluar las opciones de reemplazo.

Participaron treinta y nueve compañías –en Europa, Japón y Norte América-. Compartieron resultados analíticos así como los hallazgos a partir de pruebas de equipos y calorimétricas, tanto para “inclusión” (conversiones mínimas) como para diseños optimizados del refrigerante.

AREP evaluó 14 refrigerantes opcionales seleccionados como reemplazos potenciales para el R-22. Las opciones incluían: R-134a; R-32/125 (60.0/40.0); R-32/134a (20.0/80.0), (25.0/75.0), (30.0/70.0) y (40.0/60.0); R-32/227ea (35.0/65.0); R-125/143a (45.0/55.0); R-32/125/134a (10.0/70.0/20.0) [R-407B], (24.0/16.0/60.0) y (30.0/10.0/60.0); además de R-32/125/290/134a (20.0/55.0/5.0/20.0). También se incluyeron R-290 (propano) y R-717 (amoníaco), aunque las pruebas reales de estos dos refrigerantes fueron limitadas. Las opciones adicionales incluyeron cuatro reemplazos para R-502, es decir R-125/143a (45.0/55.0), R-32/125/134a (20.0/40.0/40.0) [R-407A]; R-125/143a/134a (10.0/45.0/45.0) y R-125/143a/134a (44.0/52.0/4.0) [R-404A].

Con base en los hallazgos, la mayoría de fabricantes de equipos unitarios y pequeños compresores convergieron en la mezcla binaria de R32/125, formulada después para el R-32/125 (50.0/50.0) [R-410A] para aumentar el desempeño y evitar al mismo tiempo la inflamabilidad. Esta mezcla azeotrópica próxima opera a presiones de condensación significativamente mayores –aproximadamente 60% mayores que el R-22 para sistemas de aire refrigerado-, pero ofrece un tamaño redu-



R-410A.



R-507.

Mezclas que reemplazan el R-22

	<i>Equipo Existente (puede requerir conversión)</i>				<i>Equipo Nuevo</i>	
R-22	R-407C	R-411A	R-417A	R-419A	R-407C	R-407E
	R-421A	R-421B			R-410A	R-410B
					HCs	
R-502	R-402A	R-402B	R-403A	R-403B	R-404A	R-407A
	R-404A	R-407A	R-407B	R-408A	R-507A	R-509A
	R-409A	R-411B	R-422A	R-507A	HCs	


cido del equipo. Una mezcla ternaria, R R-32/125/134a, sobresalió como opción de servicio al utilizar diferentes índices de componentes formulados para aproximar las propiedades de temperatura-presión del R-22 y el R-502. El R-32/125/134a (30.0/10.0/60.0) acumuló gran interés como una opción a corto plazo y para uso futuro como un fluido de servicio. Los fabricantes revisaron luego la formulación para el R-32/125/134a (23.0/25.0/52.0) [R-407C] para reducir el potencial de inflamabilidad con fraccionamiento.


El esfuerzo de AREP se relacionaba solamente con la evaluación pre-competitiva. Los fabricantes individuales desarrollaron métodos competitivos para diseñar y optimizar el equipo real. Minor (2004) resume una amplia revisión de la literatura sobre las pruebas y cambios necesarios para el equipo real. Incluían cambios a compresores, intercambiadores de calor y

dispositivos de control, así como lubricantes. La mayoría de los informes citados mostraron una eficiencia de energía equivalente o mejorada para el R-410A comparado con el R-22, específicamente aumentos entre 1% y 7% para refrigeración y disminuciones de 3% y aumentos del 7% para calefacción.

Puesto que la infraestructura de servicio y el uso común de algunos compresores y dispositivos de control para equipo residencial y de comercio liviano, demandaban prácticamente selecciones uniformes, existe menos coherencia en equipos mayores. El R-134a es el reemplazo de mayor uso en enfriadores con compresores de tornillo (175-1500 kW, 50-450 toneladas), refrigerados tanto con agua como con aire. Otras opciones incluyeron R-410A y, hasta cierto límite inicialmente en Europa, el R-717 (amoníaco) y el R-1270 (propileno). El interés inicial en el R-407C y el R-404A (menos común) para acelerar la entrada en el mercado se ha ido desvaneciendo. Un nuevo producto, que también utiliza el R-134a, ofrece un compresor centrífugo muy compacto y accionado por inversor para reemplazar los compresores de tornillo y de pistón oscilante y lograr así una eficiencia altamente mejorada en capacidades similares.

El interés continúa en el R-407C para enfriadores con fuente de agua, particularmente en Europa. Aunque la eficiencia generalmente llega a ser un 7% menor que la del R-22 para diseños convencionales, se están considerando dos desarrollos. El uso de un intercambiador de calor con líquido de succión puede lograr ganancias del 2% en la eficiencia. Pueden lograrse mejoras más significativas aprovechando el alto grado de deslizamiento del R-407C (rango de temperatura de evaporación y condensación) entre 4°C y 5°C (entre 7° F y 9° F). También puede alcanzarse una mejora de hasta el 5% utilizando intercambiadores de calor de contraflujo para aproximar un ciclo termodinámico de Lorenz (el que aprovecha el deslizamiento para reducir el aumento neto de temperatura utilizando evaporadores y condensadores de contraflujo).

En el próximo artículo trataremos los temas de las propiedades ambientales, las propiedades termodinámicas y propiedades de transporte. 

En el próximo artículo trataremos los temas de las propiedades ambientales, las propiedades termodinámicas y propiedades de transporte. 

** James M. Calm, P.E., es un consultor de ingeniería en Great Falls, Va. Piotr A. Domanski, Ph.D., dirige el HVAC&R Equipment Performance Group del Instituto Nacional de Normas y Tecnología en Gaithersburg, Md.*

Segunda entrega

Condiciones de reemplazo del R-22

Puesto que la decisión de eliminar gradualmente el R-22 se basa en su potencial para agotar el ozono estratosférico, la consideración de alternativas debe tener en cuenta datos ambientales adicionales.

por James M. Calm, P.E.,
Socio de ASHRAE, y
Piotr A. Domanski,
Ph.D., Miembro de
ASHRAE

Las propiedades ambientales que se deben tener en cuenta para la transición del R-22, incluyen la información presentada en la tabla siguiente en la que se compara la duración atmosférica promedio (t_{atm}), el potencial de agotamiento del ozono (ODP) y el potencial de calentamiento global (GWP) para el R-22, con los de las alternativas seleccionadas.

La duración atmosférica indica la persistencia promedio del refrigerante liberado en la atmósfera hasta que se descompone, reacciona con otros químicos, se desvanece o es removido de otra forma. Sugiere el tiempo de duración atmosférica promedio y, por lo tanto, el potencial para acumulación. La duración atmosférica larga implica el potencial para la recuperación lenta a partir de problemas ambientales, tanto las preocupaciones ya conocidas como las que surgen que pueden ser identificadas en el futuro. Por lo tanto, lo ideal es una duración atmosférica corta.

Los valores mostrados para la duración del refrigerante son

duraciones atmosféricas compuestas. Las duraciones también pueden mostrarse individualmente para las capas troposféricas (la atmósfera más baja, en la que vivimos), estratosféricas (capa siguiente en donde es preocupante el agotamiento global del ozono) y capas más altas, puesto que los principales mecanismos de remoción cambian entre capa y capa.

El ODP es un indicador normalizado, relacionado con el R-11, sobre la capacidad de los refrigerantes (y otros químicos) para destruir las moléculas de ozono de la estratosfera. Los datos mostrados son los valores presentados que han sido adoptados para la evaluación científica internacional. Los ODPs mostrados para mezclas son promedios ponderados de masa.

Tanto el ODP como el GWP se calculan a partir del t_{atm} , las propiedades químicas medidas y otros datos atmosféricos. El t_{atm} , el

Propiedades Ambientales del R-22 y sus reemplazos con base en Calm y Hourahan (2001), IPCC (2001) y WMO (2003)

Refrigerante	Duración Atmosférica Promedio (años)	ODP	GWP (100 años)
R-22	12.0	0.034	1780
R-123			
R-134a	14.0	~ 0.0	1320
R-407C	a	~ 0.0	1700
R-407E	a	~ 0.0	1400
R-410A	a	~ 0.0	2000
R-32	4.9	~ 0.0	543
R-32/600 (95.0/5.0)	a	~ 0.0	520
R-32/600a (90.0/10.0)	a	~ 0.0	490
R-290 (propano)	b	0.0	~ 20
R-717 (amoníaco)	b	0.0	< 1
R-744 (dióxido de carbono)	> 50	0.0	^o 1
R-1270 (propileno)	b	0.0	~ 20

^a La duración atmosférica promedio no está dada para mezclas, puesto que los componentes se separan en la atmósfera.

^b Desconocida.



James M. Calm.

ODP, y el GWP deben ser todos lo más bajo posible para que un refrigerante sea ideal, pero esas metas deben ser evaluadas junto con los criterios para desempeño, seguridad y para la estabilidad química y térmica en el uso. Calm y Hourahan (2001) discuten estos parámetros, otras formas para determinar los ODPs y su importancia.

Eficiencias comparativas

Las eficiencias comparativas de los refrigerantes dependen principalmente de cinco factores:

1. Propiedades termodinámicas

Hasta qué punto opera el ciclo de refrigeración por debajo del punto crítico (qué afecta el índice del calor de evaporación latente para el calor específico del líquido a presión constante).

Las inclinaciones de la succión saturada y las líneas de líquido, lo que determina los efectos comparativos del supercalentamiento, el subenfriamiento y la obturación. Las inclinaciones están influenciadas fuertemente por la capacidad de calentamiento molar.

2. Propiedades de transporte

Conductividad térmica y viscosidad, que influyen en la transferencia de calor y en la fricción del fluido.

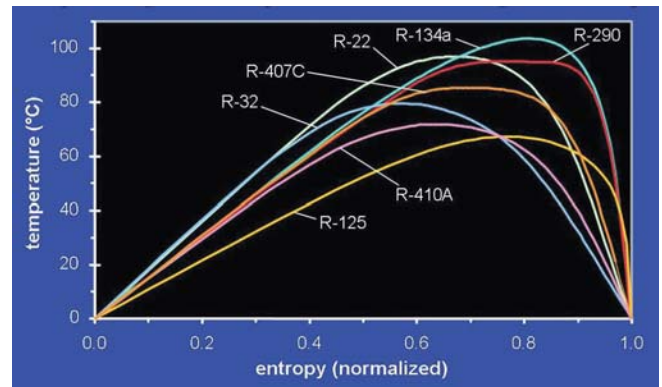
3. Aplicación

Transferencia de calor afectada por el deslizamiento del refrigerante y la configuración del intercambiador de calor.

Optimización del ciclo para el fluido por medio del control del supercalentamiento, el subenfriamiento, graduación con economizadores e inclusión de características tales como intercambiadores de calor de línea de líquido / línea de succión.

El siguiente diagrama muestra la relación temperatura-entropía del R-22 y los reemplazos seleccionados para facilitar la evaluación cualitativa del impacto de las propiedades termodinámicas sobre el coeficiente de desempeño (COP). La figura representa gráficamente la entropía como una cantidad adimensional normalizándola para el ancho del domo de dos fases (es decir: líquido saturado = 0 y vapor saturado = 1). Observe que la temperatura de punto crítico, en la parte superior de la región de dos fases, es mayor para el R-134a que para el R-22. Igualmente, la temperatura crítica es menor para el R-410A y también para el R-125, un componente (50% por masa) de la mezcla R-410A. Para

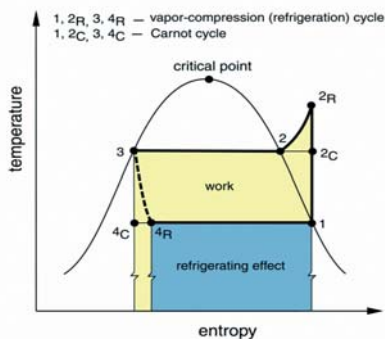
Gráfico 1. Diagrama de temperatura-entropía para R-22 y reemplazos seleccionados.



La entropía normalizada se representa gráficamente como índice adimensional para facilitar las comparaciones.

las mismas temperaturas de evaporación y condensación, un ciclo que utiliza R-134a opera más allá de su punto crítico que el R-22, y mucho más allá que el R-410A y el R-125.

Gráfico 2. Ciclo de Vapor-Compresión (refrigeración) sobre el diagrama generalizado temperatura-entropía (T-S).



El diagrama anterior muestra un ciclo de vapor-compresión (refrigeración) sobre un diagrama simplificado temperatura-entropía (T-S). El efecto refrigerante por unidad de flujo de masa es igual al área bajo la línea de evaporación, mientras que el trabajo necesario para conducir el ciclo es el área bajo las líneas de condensación y des-supercalentamiento menos el área que denota el efecto refrigerante. Con relación al ciclo de Carnot, las irreversibilidades inducidas por obturación reducen el efecto de refrigeración a través del área bajo la línea 4C-4R. Esta área representa el requerimiento adicional de trabajo causado por la obturación (trabajo de expansión perdido). El trabajo adicional requerido debido al pico de vapor supercalentado es denotado por el área 2-2C-2R. Las irreversibilidades inducidas por obturación y del pico de vapor supercalentado se afectan por las inclinaciones de las líneas de saturación. Estas pérdidas son mayores cerca al punto crítico, en donde las líneas de saturación gradualmente se vuelven más delgadas para acercarse al domo de dos fases.

El R-410A tiene una temperatura crítica menor que el R-22, y por esta razón las irreversibilidades del pico de vapor supercalentado y las irreversibilidades inducidas por obturación son mayores para el R-410A que para el R-22. De los dos componentes del R-410A, el R-32 ofrece un mayor desempeño termodinámico que el R-125 para las condiciones de interés, aunque el componente del R-125 compensa la inflamabilidad limitada del R-32. El componente del R-125 también incrementa el GWP de la mezcla. Por consiguiente, otras mezclas de R-32 pueden seguir siendo de interés. Dos ejemplos, R-32/600 (95.0/5.0) y R-32/600a (90.0/10.0), se incluyen en las tablas 3 y 4 para comparación. Estas mezclas azeotrópicas de R-32 con n-butano e isobutano, respectivamente, ofrecen ventajas de desempeño (Yoshida et al., 1999) y podrían ser utilizadas con lubricantes de aceite mineral. Sin embargo, ambas mezclas son un poco inflamables.

Las simulaciones termodinámicas dan una idea de las eficiencias alcanzables con ciclos teóricos, es decir, excluyendo los impactos de las propiedades de transporte, ajuste del ciclo y los efectos de los lubricantes. La tabla siguiente muestra las eficiencias calculadas de refrigeración para reemplazos seleccionados del R-22 en acondicionadores de aire unitarios y en enfriadores helados con agua con ciclos simples (de una etapa y sin ajustes para propiedades individuales de refrigerantes específicos). La tabla indica tanto los valores de COP como los de poder específico (recíproco de eficiencia), el último de los cuales es más común para discusiones sobre enfriadores.



Piotr A. Domanski.

Los refrigerantes con transferencia de calor menor pueden no desempeñarse tan bien como los que tienen una transferencia de calor superior, a pesar de la ventaja termodinámica, pero la compensación de diseño puede compensar esta diferencia. De igual forma, las mezclas con alto deslizamiento, como el R-407C, pueden no lograr el desempeño indicado con diseños de intercambiadores de calor de flujo cruzado (movimiento de aire o agua –aunque menos común– perpendicular al flujo del refrigerante), pero puede superarlo con intercambiadores de calor de contraflujo.

Algunos reemplazos, tales como el R-134a en enfriadores, ofrecen una mayor eficiencia que el R-22. Para los otros, los fabricantes han mejorado los diseños de equipos para compensar teóricamente las pérdidas de eficiencia. Domanski (1995), Calm y Didion (1997) evalúan algunas de las implicaciones y conveniencias para una menor eficiencia teórica. Domanski y Payne (2002) muestran que el R-410A sufre una degradación relativa de la eficiencia comparado con el R-22 a temperaturas de condensación altas, aunque su desempeño puede ser comparable con el R-22 bajo condiciones de operación normales. Spatz y Yana Motta (2003) discuten el descenso de la presión y las consideraciones del intercambio térmico que conducían al mejoramiento de la eficiencia. Yoshida et al. (1999) ofrecen interesantes formas de lograr eficiencia utilizando mezclas azeotrópicas o azeotrópica próxima del R-32 con hidrocarburos y poder hacer posible un regreso a los lubricantes de aceite mineral, aunque dichas mezclas son inflamables.

Muchos reclamos conflictivos se presentan con respecto a la eficiencia del dióxido de carbono (R-744, CO₂). Una razón es que la mayoría de las aplicaciones requieren un ciclo transcrito en vez de un ciclo convencional de compresión por vapor. Este refrigerante venerable no ofrece un potencial significativo en algunas aplicaciones. Un ejemplo lo podemos observar en la etapa baja de los sistemas de refrigeración industrial en cascada, pero reemplaza generalmente al amoníaco en ese uso. Brown

Eficiencias comparativas del refrigerante para acondicionadores de aire unitarios

Condiciones	Ciclo Ideal ^{a,b}			Condiciones Normales ^{b,c}		
	(°C)	(%)	(°F)	(°C)	(%)	(°F)
Temperatura de evaporación promedio	10.0		50.0	10.0		50.0
Supercalentamiento ^d	0.0		0.0	5.0		9.0
Temperatura de condensación promedio	35.0		95.0	46.1		115.0
Subenfriamiento ^d	0.0		0.0	5.0		9.0
Eficiencia isentrópica del compresor		100			70	
Eficiencia del motor		100			90	
Control y otro uso de poder		0			0	
	COP	Poder Específico		COP	Poder Específico	
Refrigerante	(kW/kW)	(kW/ton)		(kW/kW)	(kW/ton)	
R-22	9.85	0.36		4.06	0.87	
R-32 ^e	9.55	0.37		3.84	0.92	
R-134 ^a	9.86	0.36		4.13	0.85	
R-290 (propano) ^e	9.68	0.36		4.05	0.87	
R-407C	9.60	0.37		3.97	0.89	
R-407E	9.67	0.36		4.00	0.88	
R-410 ^a	9.29	0.38		3.77	0.93	
R-32/600 (95.0/5.0) ^e	9.54	0.37		3.85	0.91	
R-32/600a (90.0/10.0) ^e	9.43	0.37		3.81	0.92	

^a Las condiciones son para la condición "A" de porcentajes índices estándar para acondicionadores de aire unitarios y bombas de calor (ARI, 2003). El estándar del índice específica solamente las temperaturas de aire entrante interno (26.7°C, 80.0°F) y externo (35.0°C, 95.0°F), pero la temperatura de evaporación es restringida en la práctica a 10°C (50.0°F) para ofrecer deshumidificación.

^b Los cálculos fueron hechos con CYCLE_D 3.0 (Domanski et al., 2003).

^c Las condiciones se aproximan a las encontradas normalmente sobre el lado refrigerante del ciclo. Las eficiencias "normales" mostradas pueden excederse al optimizar el subenfriamiento y el supercalentamiento, empleando múltiples etapas o utilizando modificaciones similares del ciclo. Igualmente, los diseños débiles pueden dar como resultado un desempeño más bajo.

^d El supercalentamiento y el subenfriamiento normales varían de acuerdo al refrigerante; el nivel mostrado es una selección representativa para comparaciones.


^e Inflamable.

et al. (2002) ofrece una evaluación detallada para las aplicaciones residenciales que utilizan tanto modelos de ciclo transcrito como modelos convencionales de compresión por vapor. Ellos concluyen que el dióxido de carbono da como resultado una eficiencia significativamente menor cuando se utilizan intercambiadores térmicos equivalentes. Eso sugiere que las mejores propiedades de transporte y el incremento constantemente reclamado en la eficiencia isentrópica del compresor, no compensan las desventajas termodinámicas. Esta desventaja incluso será más notable para los niveles de eficiencia que excedan significativamente los de más alta selección hoy en día.

El desempeño del hidrocarburo es ilustrado por las eficiencias mostradas para el propano (R-290) en la tabla anterior, comparado con las ventajas ambientales particulares. La limitación principal para ellas no es el desempeño, sino la seguridad, como se discutió.

La importancia de la eficiencia se basa en dos razones. En primer lugar, en relación con el cambio climático global requerirá mejoras significativas en el desempeño para reducir las emisiones de gas de invernadero relacionadas con energía. La segunda

tiene que ver con el nivel de eficiencia mínimo necesario para un equipo unitario (que es el de mayor uso del R-22) que en los Estados Unidos aumentará en 30% durante la transición del R-22 en el nuevo equipo.

Kul et al. (Kul 2004) resume las evaluaciones de desempeño para un rango de candidatos del hidrofuroéter (HFE) incluyendo mezclas de HFEs con HFCs, propuestas como alternativas para el R-22. Ellos concluyeron que los coeficientes calculados del desempeño (COPs) oscilaban entre 80% y 90% de aquel para el R-22. Identificaron igualmente el R-E125 (CHF₂OCHF₃) y sus mezclas ternarias con el R-32 y con el R-134a o el R-152a como los candidatos más promisorios, pero incluso sugieren COPs que alcanzan solamente entre 90% y 93% de aquel para el R-22. 

* James M. Calm, P.E., es un consultor de ingeniería en Great Falls, Va. Piotr A. Domanski, Ph.D., dirige el HVAC&R Equipment Performance Group del Instituto Nacional de Normas y Tecnología en Gaithersburg, Md.

Última entrega

Condiciones de reemplazo del R-22

En la tercera parte trataremos el tema de la transición a refrigerantes ambientalmente más seguros y la eliminación gradual del R-22. Se analizarán los reemplazos principales por tipo de equipo y aplicación.



Bomberos intervienen en una fuga de amoníaco en España (Cortesía: www.bombers.dva.gva.es)

por James M. Calm, P.E.,
Socio de ASHRAE, y
Piotr A. Domanski, Ph.D.,
Miembro de ASHRAE

Los refrigerantes fluorocarbónicos fueron presentados para mejorar la seguridad. Con la eliminación gradual de algunos refrigerantes claves, incluyendo el R-22, algunos proponentes defienden un regreso a los que son denominados "refrigerantes naturales". Estos incluyen el amoníaco, el dióxido de carbono y los hidrocarburos.

El amoníaco (R-717) ofrece un atractivo significativo por su eficiencia, como se muestra en

la siguiente tabla, y también resulta de muy bajo costo. Es el refrigerante de más amplio uso en el procesamiento de alimentos y bebidas y en bodegas de almacenamiento frío, pero las preocupaciones por su toxicidad (y específicamente por la acción corrosiva para la piel) y su inflamabilidad han retardado su uso tranquilo en los sistemas.

El dióxido de carbono (R-744) fue uno de los primeros refrigerantes, y todavía es utilizado en sistemas industriales. Sin embargo, opera a presiones mucho más altas que el R-22 y re-

quiere ciclos transcíticos, puesto que las temperaturas convencionales de condensación exceden su temperatura crítica.

Los hidrocarburos, especialmente el etano (R-170), el propano (R-290), el n-butano (R-600), el isobutano (R-600a), el etileno (R-1150), y el propileno (R-1270), ofrecen una buena eficiencia y propiedades similares a las de algunos fluorocarbónicos. Son considerablemente bajos en el costo y son considerados ambientalmente aceptables, pero son altamente inflamables e incrementan significativamente las preocupaciones relacionadas con la seguridad. Su uso requiere una atención cuidadosa de los factores de seguridad.

La aceptación europea es mayor para los hidrocarburos, tanto en sistemas pequeños (por ejemplo para reemplazar el R-12 en refrigeradores domésticos y en enfriadores comerciales para bebidas) y en sistemas aislados grandes. El uso del amoníaco y del propileno es aceptado en enfriadores refrigerados con agua ubicados en cuartos de máquinas protegidos, pero el tamaño agregado del mercado es comparativamente pequeño.

Los códigos de consideraciones de responsabilidad y seguridad disminuyen el interés en su uso en Norte América y en naciones desarrolladas de Asia. La Norma 5 de ASHRAE limita la cantidad de refrigerantes inflamables que pueden ser utilizados en sistemas grandes. Los fabricantes se han enfocado principalmente en refrigerantes clasificados en la Norma 34 de ASHRAE como A1 (de toxicidad más baja y no presentan propagación de llamas por pruebas prescritas), particularmente para sistemas residenciales y pequeños sistemas comerciales.

Compatibilidad de los materiales

El cambio más significativo en la presentación de los reemplazos del R-22 se relaciona con la elección de lubricantes relacionados. Mientras que los sistemas de R-22 generalmente utilizaban aceites minerales nafténicos y aditivados, las alternativas del hidrofluorocarbono (HFC) requieren lubricantes sintéticos para que la miscibilidad regrese el lubricante al (los) compresor(es). Los principales nuevos lubricantes son una gama de poliésteres (POEs) en viscosidades apropiadas*. Las opciones del alquilo-benceno (AB) y el poliviniléter (PVE) también están disponibles para propósitos especiales. Aunque es ampliamente utilizado con el R-134a en acondicionadores de aire móviles y en refrigeración de transporte, los lubricantes de polialquileno (PAG) no son comunes en sistemas fijos.

La elección del lubricante es compleja y los usuarios deben seguir las recomendaciones del fabricante del equipo o, en el caso del diseño del equipo, seguir las recomendaciones del fabricante del compresor. Los requerimientos caseros para mantener la humedad y otros contaminantes aparte de los circuitos de refrigeración son mucho más exigentes para la mayoría de lubricantes sintéticos.

La modificación retroactiva de las conversiones del R-22 a reemplazos, generalmente requiere de procedimientos especiales para la remoción del lubricante. Algunos fabricantes de refrigerantes ofrecen alternativas para el R-22, específicamente fórmulas para permitir las conversiones del refrigerante sin cambiar el lubricante. Puesto que actualmente el R-22 se consigue fácilmente y será aun más fácil para un futuro previsible, la mayoría de los usuarios no requerirán conversiones de refrigerante para los equipos existentes que utilizan

R-22, incluso para el que será producido en años venideros, por su duración normal y tomando las medidas necesarias para evitar y reparar los escapes.

Otros asuntos relacionados con la compatibilidad de materiales son complicados. La industria de refrigeración y de acondicionamiento de aire realizó un estudio amplio y durante varios

Condiciones	Ciclo ideal ^{a,b}		Condiciones normales ^{b,c}	
	(°C)	(%)	(°F)	(°C)
Temperatura de evaporación promedio.	6.7		44.0	5.0
Supercalentamiento. ^d	0.0		0.0	1.0
Temperatura de condensación promedio.	29.4		85.0	35.0
Subenfriamiento. ^d	0.0		0.0	5.0
Eficiencia isentrópica del compresor.		100		80
Eficiencia del motor.		100		95
Control y otro uso del poder.		0		0

Refrigerante	COP	Poder específico	COP	Poder específico
	(kW/kW)	(kW/ton)	(kW/kW)	(kW/ton)
R-22	10.92	0.32	6.18	0.57
R-32 ^e	10.64	0.33	5.97	0.59
R-123	11.42	0.31	6.52	0.54
R-134 ^a	10.93	0.32	6.24	0.56
R-407C	10.69	0.33	6.09	0.58
R-410 ^a	10.42	0.34	5.90	0.60
R-717 (amoníaco) ^e	11.21	0.31	6.24	0.56
R-1270 (propileno) ^e	10.72	0.33	6.10	0.58

^a Las condiciones son las de los índices estándar para enfriadores refrigerados con agua (ARI, 1998).
^b Los cálculos fueron hechos con CYCLE_D 3.0 (Domanski et al., 2003).
^c Las condiciones se aproximan a las encontradas normalmente sobre el lado refrigerante del ciclo. Las eficiencias "normales" mostradas pueden excederse al optimizar el subenfriamiento y el supercalentamiento, empleando múltiples etapas, o utilizando modificaciones similares del ciclo. Igualmente, los diseños débiles pueden dar como resultado un desempeño más bajo.
^d El supercalentamiento y el subenfriamiento normales varían de acuerdo al refrigerante; el nivel mostrado es una selección representativa para comparaciones.
^e Inflamable.



En Europa, los hidrocarburos gozan de cierta preferencia a la hora de reemplazar el R-12 en aplicaciones domésticas y en enfriadores comerciales.

años conocido como el Programa para la Investigación sobre Lubricantes y Compatibilidad de Materiales (MCLR, por sus siglas en inglés) para evaluar la compatibilidad de las alternativas con los materiales utilizados en la fabricación de circuitos de refrigerantes.



Piotr A., Domanski

Tanto los proveedores de equipos y componentes como los fabricantes de refrigerantes y lubricantes realizaron amplios estudios adicionales para calificar materiales para reemplazos. Los asuntos de compatibilidad generalmente se resuelven para los reemplazos del R-22, pero los diseñadores de componentes y equipos deben tener mucho cuidado en la selección de materiales apropiados.



James M., Calm

El amoníaco es el único reemplazo para el R-22. El equipo utilizado es muy diferente ya que los sistemas de amoníaco normalmente están diseñados para lubricantes inmiscibles. Mientras el mismo amoníaco es compatible con el cobre, esto no se cumple en presencia de humedad. Como resultado, el amoníaco generalmente no es utilizado con metales cúpricos para intercambiadores

térmicos, bobinados de motores, o tuberías. La conversión del equipo de R-22 a amoníaco normalmente no es factible.

Los refrigerantes de hidrocarburos generalmente son compatibles con los materiales utilizados en sistemas diseñados para el R-22 y generalmente pueden utilizar los mismos lubricantes o similares. Sin embargo, su sustitución requiere especial atención por asuntos de seguridad, incluyendo consideraciones específicas de aplicación.

Principales reemplazos del R-22.

El principal reemplazo en acondicionadores de aire y bombas de calefacción es el R-410A (que es el principal uso de refrigerantes del R-22), aunque el reemplazo no es directo puesto que las diferencias entre estos dos refrigerantes implican diferentes diseños.

La mayoría de los principales fabricantes de equipos ya ofrecen productos con R-410 A para los tamaños comunes. Aproximadamente 10% de los productos unitarios actualmente utilizan el R-410A, pero este porcentaje aparentemente excederá del 80% en los Estados Unidos hacia finales del 2007 y cerca del 100% hacia finales del 2009.

El R-410A también es el principal reemplazo para acondicionadores de aire de ventana rediseñados, acondicionadores de aire terminales integrados, bombas de calefacción con fuente de agua y enfriadores pequeños. Las opciones cambian con el aumento

Los reemplazos principales para el R-22 por tipo de equipo y aplicación.

Grupo del Equipo	Aplicaciones Normales	Principal(es) Reemplazo(s)
Acondicionadores de aire de ventana.	Residencial.	R-410A
Acondicionadores de aire de sistema dividido e integrados, y bombas de calefacción (aire a aire).	Residencial, comercial liviano	R-410A
Sistemas aplicados: acondicionadores de aire terminales integrados, bombas de calefacción de fuente de agua y tierra, multi-splits.	Comercial, institucional.	R-410A
Sistemas aplicados: multi-splits.	Residencial, comercial, institucional.	R-410A R-407C
Grande unitario.	Comercial, institucional.	R-134a R-410A
Enfriadores		
Refrigerados por aire.	Sistemas centrales.	R-134a R-410A R-123
Refrigerados por agua.	Sistemas centrales.	R-123 R-134a
Refrigeración comercial.	Comercial.	R-134a R-404A R-410A R-507A
Refrigeración industrial.	Industrial.	R-134a amoníaco
Refrigeración de transporte.	Transporte.	R-134a

del tamaño de los equipos, particularmente para enfriadores que utilizan compresores de tornillo. El R-134a sobresale como el refrigerante de más amplio uso en enfriadores de tamaño medio, aunque algunos fabricantes utilizan el R-410A y otros refrigerantes.

El R-134a opera a presiones menores mientras que el R-410a opera a presiones mayores, así que los diseños de equipo nuevamente son diferentes. Los fabricantes han dejado de utilizar principalmente el R-22 en enfriadores muy grandes que utilizan compresores centrífugos.

Esto cambia la selección a diseños que utilizan el R-123 y el R-134a, siendo el R-123 de mayor aceptación actualmente. También es la elección para la eliminación gradual de producción como en el caso de los HCFC, pero en fechas posteriores al R-22 debido a su ODP más bajo y al reconocimiento de importantes beneficios adicionales (Calm y Didion 1997, Calm 2000, UNEP 2003b).


La producción actual del R-22 está por debajo de las cuotas asignadas de fabricación. Las disminuciones significativas futu-

ras del R-22 probablemente se deberán a las autorizaciones de producción para el servicio, el potencial de almacenaje para uso futuro, existencia de fluidos de servicio alternativos, y potencial grande para recuperar el R-22 que ya está en uso. Cualquier disminución del crecimiento para las futuras necesidades de servicio podría conducir a mayores precios y, a la vez, a reemplazos y cambios acelerados a fluidos de servicio alternativos, y una mayor recuperación, por lo tanto no se espera que se presenten disminuciones importantes.

Conclusiones

Todo apunta a una transición ordenada a los reemplazos del R-22. Ya que no se han identificado refrigerantes de un solo compuesto como alternativa apropiada para la mayoría de aplicaciones, las mezclas ofrecen una buena opción. La industria de refrigeración y acondicionamiento de aire ha desarrollado el equipo que se ajusta o incrementa la eficiencia de los fluidos de reemplazo. Los resultados favorables con productos anteriores y la experiencia con la eliminación preliminar gradual de clorofluorocarbonos (CFCs) sugieren que la eliminación gradual del R-22 será mane-

jable e incentivará avances significativos de la tecnología. Además, al igual que con la experiencia que se tuvo con la eliminación gradual del CFC, no se esperan disminuciones significativas para las necesidades futuras de servicio del R-22, a pesar de haberse dado la terminación de su producción.

Nota: Algunos de los refrigerantes, procesos o aplicaciones específicos de fabricación para ellos, están protegidos por patentes dadas por otras partes; la mención que se hace en este artículo no implica que la producción o su uso sean restringidos. 

* Se presentó una amplia disminución de POEs en el momento que fue escrito este artículo. Una planta que producía una mayor participación del suministro mundial de un ácido utilizado para fabricar POEs fue cerrada por problemas de seguridad no relacionados con el ácido. Este cierre inesperado causó interrupciones en la producción que pueden durar un año en ser rectificadas.



El R-410 A es el principal reemplazo para el R-22.

James M. Calm, P.E., es un consultor de ingeniería en Great Falls, Va, Piotr A. Domanski, Ph.D., dirige el HVAC&R Equipment Performance Group del Instituto Nacional de Normas y Tecnología en Gaithersburg, Md.