

Opciones y panorama de refrigerantes de enfriamiento

por James Calm*

Elegir un refrigerante fue simple -o al menos, más simple- hasta finales de 1989. Las alternativas para enfriadores centrífugos (turbo) se encontraban entre el R-11, el R-12, el R-22 y el R-500. Otras necesidades especiales, como las que servían bajas capacidades u operación a altas temperaturas de condensación para recuperación de calor, exigían R-113 o R-114, respectivamente. La mayoría de los ingenieros no especificaba un refrigerante determinado o admitía alternativas en la revisión del contrato. Ellos simplemente estipulaban la capacidad, las especificaciones de operación y características requeridas de tamaño de ductos, potencia y control.

Opciones previas

El R-11, un clorofluorocarbono (CFC), acaparaba la mayoría, debido en gran medida a su eficiencia y la rentabilidad de los enfriadores de baja presión. Aproximadamente, dos de cada tres instalaciones centrífugas utilizaban este re-

frigerante. Actualmente hay en uso más enfriadores con R-11 que todos los centrífugos combinados, incluso a pesar de que su producción se suspendió en los países desarrollados desde 1994. Esta paradoja se deriva de la gran cantidad instalada aunada a los bajos índices de reemplazo y conversión.

La siguiente elección más común era el R-12, para ampliar el rango centrífugo competitivo a capacidades inferiores y por ventajas de costo cuando no se exigía una alta eficiencia. El R-500 se introdujo en los enfriadores centrífugos para lograr las mismas capacidades con velocidades de motor de 50 Hz, como se lograba con el R-12 a 60 Hz para diseños similares. Después se popularizó su uso en equipos de 60 Hz para expandir el rango de capacidades. La potencia de 50 Hz es estándar en Europa, parte de Japón, y en los demás países de Asia; 60 Hz de potencia es norma en la mayor parte de Norteamérica y el resto de Japón.

La mayoría de los enfriadores con compresores de barra, pistón o tornillo (desplazamiento completamente positivo) usaban el R-22, un hidroclorofluorocarbono (HCFC) de alta presión. Este versátil refrigerante dominó también en los enfriadores de mayor tamaño -que excedían de 5 MW (1.400 ton)- usando compresores centrífugos. Un número de sistemas pequeño en comparación -menos de 10% del total- usaba R-717 (amoníaco) o enfriadores de ciclo de absorción. La mayor parte de estos últimos usaba agua y bromuro de litio como refrigerante y absorbente, respectivamente.

Opciones actuales

Las alternativas para enfriadores centrífugos se encuentran hoy en día entre el R-22, en capacidades grandes y pequeñas, R-123 y R-134a. El equilibrio entre el R-123 y el R-134a es similar al del R-11 y el R-12. Cerca de dos tercios de las nuevas instalaciones utilizan R-123 (un HCFC de baja presión).

La mayor parte de los restante emplean R-134a (un hidrofluorocarbono de presión me-

dia). La acogida del R-134a es notablemente mayor en otros usos, y se cree que reemplazará al R-22 como el refrigerante más usado.

Las conversiones de viejos enfriadores con R-114 en naves militares, especialmente submarinos, usan R-236f (un HFC de presión media), pero ningún fabricante lo vende para enfriadores nuevos en aplicaciones estacionarias.

Aunque el R-22 domina en los enfriadores más pequeños con compresores de desplazamiento positivo, el panorama está cambiando. Los diseños que usan R-134a, así como R407c y R-410a (ambos mezclas de HFC) se están introduciendo para reemplazar los equipos con R-22. Unos cuantos enfriadores pequeños, principalmente en Europa, usan R-404a (otra mezcla de HFC). Aunque las características de presión-temperatura del R-407c son similares a las del R-22, su empleo requiere modificaciones de diseño (por ejemplo, la eliminación de evaporadores inundados) para evitar cambios de composición por posibles fraccionamientos de las mezclas. Algunos nuevos diseños para R-717 explotan su deslizamiento, usando un ciclo Lorenz, para aumentar la eficiencia.

Un creciente, pero aún bajo número de pequeños enfriadores usan R-717 (amoníaco) así como -aunque con mucha menor frecuencia- hidrocarburos como el R-290 (propano), R-600 (n-butano), R-600a (isobutano), R-1270 (propileno) o mezclas de ellos. Estos gozan en Europa de una aceptación mayor que en cualquier otra parte.

Los enfriadores con ciclo de absorción, que usan en su mayoría agua/bromuro de litio, responden por menos de 2% de los envíos totales de enfriadores en Norteamérica. Esta fracción excluye los pequeños enfriadores de amoníaco/agua que compiten con los sistemas de aire acondicionado unitarios, pero detentan menos del 0,2% de participación en el mercado en esa aplicación. Aunque hay signos de reactivación del interés por los enfriadores centrífugos en Japón, los enfriadores con ciclo de absorción son

Para los dores

mucho más comunes que éstos. Esta preferencia local se debe en gran parte a las diferencias en fuentes de energía, costos resultantes y regulaciones de construcción.

¿Qué cambió?

El fabricante de equipos, en lugar del ingeniero diseñado de sistemas o el propietario de edificios, hizo la elección histórica de refrigerante. Los propietarios e ingenieros prestaron poca más atención a esta selección que a otros componentes internos. La mayoría basaron la elección de un enfriador en el costo, el desempeño, la presencia local del fabricante y las opciones de servicio, las preferencias de operación y los presupuestos de confiabilidad. Cuando fue necesario, excluyeron algunos refrigerantes para acoplarse a los requerimientos locales para permisos especiales o asistencia de operarios con refrigerantes o equipos específicos.

Las reglas cambiaron en 1987 con el acuerdo internacional en el Protocolo de Montreal, un tratado histórico para proteger la capa de ozono de la estratosfera. Cambiaron nuevamente con subsiguientes enmiendas, particularmente en 1990 y 1992, y en el último protocolo de Kioto sobre el cambio climático. Pueden augurarse futuras revisiones de ambos acuerdos ambientales por el despliegue de influencias políticas y científicas; estos cambios estimularán aún más medidas de control.

Problemas ambientales

Los dos problemas más preocupantes, el agotamiento del ozono en la estratosfera y el cambio climático, son globales.

El agotamiento del ozono en la estratosfera

El ozono, una forma de oxígeno, absorbe los rayos ultravioleta B que intentan ingresar a la

atmósfera provenientes del sol, y que de otra manera causarían daño a las personas, los animales y las plantas. Una publicación de M. J. Molina y F.S. Rouland, en 1974, identificó los CFC como la fuente de cloruro que alteraba el equilibrio en la formación y destrucción naturales del ozono. Esta publicación e investigaciones subsecuentes aumentaron la preocupación por el debilitamiento de la capa de ozono en la estratosfera a causa del cloruro y el bromuro de compuestos antropogénicos (hechos por el hombre). Estos estudios mostraron el potencial de agotamiento más severo del ozono, según proyecciones de crecimiento de estos productos.

El protocolo de Montreal exige una discontinuación escalonada de las sustancias controladas. Estas incluyen químicos con contenido de cloruro y bromuro, que se usan como refrigerantes, solventes, sopladores de espuma, propelentes de aerosol, supresores de fuego, y otros propósitos.

Cambio climático

La perspectiva del calentamiento global tiene una historia más larga. El matemático J-B Fourier identificó el papel de los gases de la atmósfera como determinantes de las temperaturas de la atmósfera y el suelo en 1827. Él fue el responsable de la analogía de su acción con la de un «invernadero». Una publicación de S. Arrhenius en 1896 advertía que las emisiones de bióxido de carbono, debido al creciente uso de combustibles fósiles, aumentarían el efecto natural de invernadero.

El cambio climático es mucho más complejo que el agotamiento del ozono por las causas implicadas, las pérdidas naturales y las incertidumbres y susceptibilidad que suscitan. Sin embargo, la mayoría de los científicos ahora coinciden en que el calentamiento sí se está presentando y las consecuencias son más agoreras.

Al contrario del agotamiento de la capa de ozono, algunos lugares se beneficiarán con el cambio del clima. Desafortunadamente, el calentamiento fomentará la

difusión de enfermedades, y grandes poblaciones asentadas cerca al nivel del mar corren el riesgo de inundarse debido al aumento en el nivel de las aguas. Además, los rápidos cambios afectarán la mayoría de cultivos y otra parte de la vida vegetal.

Importantes científicos, como J.D. Mahlman en la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA), sostienen que ya nos hemos comprometido con duplicar -y podemos asistir a una cuadruplicación- el bióxido de carbono atmosférico en el 2100. Ese es el gas que más preocupa por el efecto de invernadero.

Otro científico de la NOAA, quien ha estado al frente del problema del ozono, D.L. Albritton, ofrece una perspectiva singular. Sugiere que los historiadores pueden considerar el agotamiento del ozono en la estratosfera como un aprendizaje necesario para prepararnos para el asunto más difícil que representa el cambio de clima.

El debate sobre problemas ambientales va desde la negación o elaboración de las ventajas del cambio climático hasta advertencias apocalípticas. En su última evaluación, el Pánel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) llegó a la conclusión de que hay evidencia discernible de que el cambio climático ha comenzado.

La actual contribución de los HFC a las emisiones totales de gases causantes del efecto de invernadero es pequeña. Es menos del 2% expresadas incluso como bióxido de carbono equivalente, y teniendo en cuenta las diferencias potenciales de calentamiento global. La parte de los refrigerantes es aún más pequeña. Sin embargo, los impactos colectivos de los HFC están creciendo más rápidamente, en una base global, que los demás gases considerados en el protocolo de Kioto.

Otros

Una lección del agotamiento del ozono y el cambio climático es que las emisiones químicas pueden acumularse antes de que se reconozcan o se prueben los problemas.

Hay creciente preocupación por la acumulación de contaminantes químicos persistentes (PCP) y por su impacto en los ecosistemas. Un aspecto del problema es una amenaza a los limitados suministros de agua potable.

Figura 1. Evolución de los refrigerantes

Otra preocupación es la carga de nitrógeno de la fertilización intensiva en la agricultura, la combustión fósil y el extendido cultivo de hortalizas. Parte de la solución requerirá mejorar la eficiencia en todos los usos de la energía, incluyendo la operación de los enfriadores.

La contaminación del aire, afectada por los usos de combustibles fósiles, como los que impulsan los sistemas de refrigeración y la utilización de recursos naturales pueden seguir siendo preocupantes. Estos aumentarán con la población mundial -ahora en más de seis billones- y con el desarrollo industrial y económico.

No podemos predecir con precisión los problemas del futuro, pero debemos anticipar que surgirán algunos. En consecuencia, debemos tomar medidas prudentes para evitar alteraciones en la naturaleza y descargas de químicos con largos tiempos de vida, sabiendo que ellos o sus productos en descomposición se acumularán con el tiempo.

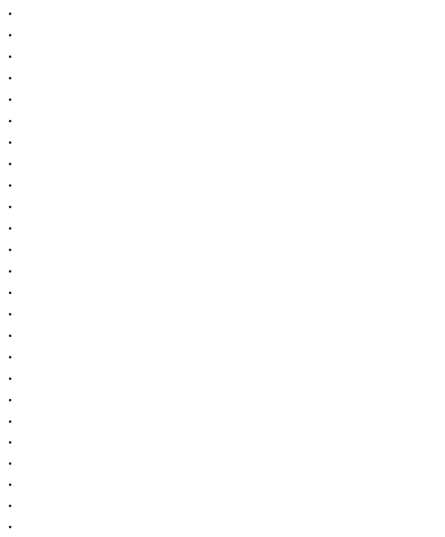
Refrigerantes

Aunque los refrigerantes contribuyen a las preocupaciones ambientales citadas, su papel es comparativamente pequeño. Una distinción de otros usos de los mismos químicos es que los refrigerantes no deben ser liberados para cumplir su función. En realidad, evitar esas emisiones mejora el sistema y reduce los costos. El problema no es con los refrigerantes contenidos en los sistemas, sino con su emisión!

La refrigeración ofrece beneficios sociales fundamentales. Algunos hacen habitables zonas poco templadas, permitiendo el almacenamiento y transporte de alimentos, así como la producción y almacenamiento de materiales médicos y farmacéuticos, y evitando la diseminación de las enfermedades. La refrigeración también hace posibles muchos procesos de producción importantes, aumenta la productividad de los trabajadores y proporciona comodidad.

Los refrigerantes son el componente más esencial de los sistemas de refrigeración. El calor removido para evaporar el refrigerante es lo que proporciona el enfriamiento.* (*Hay otras formas de proporcionar refrigeración, como usar procesos magnetocalóricos o termoacústicos, o explotar el efecto de Seebeck. Estas alternativas merecen una investigación posterior, pero en la actualidad no son prácticas excepto en aplicaciones especializadas, como los sistemas magnetocalóricos a temperaturas próximas al absoluto cero. La presente discusión trata el efecto Joule-Thomson, que es con mucho el

Figura 2. Equilibrio en aspectos de inflamabilidad, toxicidad y vida en la atmósfera con los cambios en el contenido molecular de hidrógeno, fluoruro y cloruro (de M.O. McIlinden y D.A. Didion, 1987)



más ampliamente usado por desempeño y versatilidad) La separación del refrigerante del aire u otra sustancia que se esté enfriando requiere de cierta forma de intercambiador de calor -un evaporador- para aislar el refrigerante.

Los demás componentes de un circuito de refrigeración simplemente habilitan el refrigerante. Un compresor (o una combinación de un circuito de absorción-desorción y una bomba de soluciones) eleva la presión del refrigerante, para permitir la expulsión de calor a una temperatura más caliente. Un condensador relicuifica el refrigerante de modo que éste pueda hervir, o evaporarse, nuevamente. Un dispositivo de aceleración, como una válvula u orificio de expansión, mide el flujo para separar los lados de presión alta y baja del circuito.

Todo lo demás en una operación por controles de un sistema de refrigeración en condiciones de carga variable y expulsión de calor, transporta calor del lugar servido al evaporador, transporta calor del condensador a los dispositivos de expulsión, proporciona energía para mover el sistema o funciona para mejorar la seguridad, durabilidad y confiabilidad del sistema.

Casi cualquier fluido puede usarse como refrigerante, generalmente por un cambio de fase. Las distinciones reales se basan en la estabilidad, seguridad, desempeño y compatibilidad.

Historia de los refrigerantes

El primer siglo de uso de los refrigerantes estuvo dominado por los esfuerzos de innovar con fluidos familiares -cualquiera que funcionara- en máquinas más bien prototípicas. Las metas eran proporcionar refrigeración y, además, durabilidad. Casi todos los primeros refrigerantes eran inflamables, tóxicos y algunos también muy reactivos. Los accidentes

eran comunes. Para tener una perspectiva, el propano se comercializó como el refrigerante inoloro de seguridad.

La segunda generación de refrigerantes provino de la búsqueda, en 1928, de refrigerantes menos peligrosos, para permitir la ampliación de su uso en refrigeradores domésticos. T. Midgley Jr. y sus asociados A.L. Henne y R. R. McNary, registraron tablas de propiedad para candidatos que se juzgaban estables, no tóxicos ni inflamables, y con un punto de ebullición deseado.

El resultado llamó su atención hacia el flúor orgánico, previamente ignorado, pero las deficiencias de los datos forzaron otra alternativa. Midgley se volvió hacia la tabla periódica de los elementos. Rápidamente descartó los que arrojan una insuficiente volatilidad. Luego eliminó los que producían compuestos tóxicos e inestables, así como los gases inertes, debido a sus bajos puntos de ebullición. Quedó con sólo ocho elementos: el carbono, el nitrógeno, el azufre, el hidrógeno, el flúor, el cloro y el bromuro. Esos elementos se agruparon en una hilera y una columna de la tabla periódica, con el flúor cerca al centro.

Revisiones repetidas por otros, con nuevos datos y técnicas, han convergido en los mismos hallazgos en relación con la adaptabilidad de los elementos de Midgley. Es interesante que todos los refrigerantes usados antes de 1928 estuvieran constituidos por sólo siete de los ocho elementos -excepto el flúor.

Refrigerantes ideales

Además de tener las propiedades termodinámicas deseadas, un refrigerante ideal debe ser atóxico, no inflamable y completamente estable dentro de un sistema. También debería ser ambientalmente benigno -aun con respecto a sus productos de descomposición- y disponible en abundancia o fácil de fabricar. También debería ser autolubricante y compatible con otros materiales usados para fabricar y servir a sistemas de refrigeración. Que fueran fáciles de manejar y detectar, y no requirieran presiones extremas, ni altas ni bajas.

Estos son criterios adicionales, pero ninguno de los refrigerantes actuales es ideal aun con base en la lista parcial. Los análisis químicos y termofísicos revelan conflictos en la composición y propiedades moleculares deseadas, que prácticamente descartan la posibilidad de que existan o puedan sintetizarse los refrigerantes ideales.

La figura 2 ilustra las características inherentes a los organohaluros, y específicamente entre

compuestos con cloruro, flúor e hidrógeno, además de carbono. Al aumentar el contenido de hidrógeno se acorta el tiempo de vida en la atmósfera, pero la sustancia se hace inflamable. Aumentar el contenido de flúor reduce la miscibilidad, hasta el punto de que los refrigerantes perfluorinados (completamente fluorinados) por lo general requieren lubricantes sintéticos para el retorno de aceite. Aumentar el contenido de cloruro comúnmente incrementa la toxicidad. Hay, sin embargo, muchas formas de toxicidad, como la letalidad, sensibilización cardiaca, carcinogenicidad y mutagenicidad, al igual que efectos reproductivos prooestéticos, y efectos respiratorios. Algunas toxicidades tienen naturaleza física, y otras son químicas; el contenido de

Figura 3. Impactos de la clorinación y la fluorinación en los potenciales de calentamiento global y agotamiento del ozono.

cloruro es sólo una de muchas variables determinantes.

Aumentar el contenido de flúor o cloruro aumenta la estabilidad atmosférica, lo que alarga el tiempo de vida en la atmósfera. Como se ilustra en la figura 3, el aumento del contenido de cloruro en las moléculas de refrigerante generalmente aumenta el potencial de agotamiento del ozono (ODP, en inglés). Los compuestos que no contienen bromuro o cloruro generalmente tienen ODP cercanos a cero. De modo similar, el aumento en el total de flúor suele aumentar el potencial de calentamiento global (GWP). La sustitución del hidrógeno tiende a acortar la vida en la atmósfera. Los compuestos con vidas muy cortas tendrán bajos ODP, ya que la mayor parte de emisiones se descompondrán antes de llegar a la estratosfera. También tendrán bajos valores de GWP, ya que su persistencia atmosférica tendrá una duración comparativamente corta.

Crterios de seleccin

Con el reconocimiento de que no hay refrigerantes ideales y ninguno puede ser hallado, los usuarios deben trabajar con los candi-

datos disponibles. Escoger entre ellos es algo frustrante porque la aceptabilidad futura de las alternativas parece incierta. Aún más, una seleccin informada requiere examinar diversos factores. Estos varían desde consideraciones ambientales y de seguridad hasta aspectos de desempeo y compatibilidad.

Los fabricantes de equipos que incorporan refrigerantes en productos describen sus propias elecciones como las únicas selecciones lógicas. Los fabricantes de químicos y las compañías independientes de servicios también se ven envueltas en la promocin del mercado, pero tienen menos intereses en la seleccin del refrigerante. No sorprende entonces que se haya colado al mercado informacin conflicti-

va, equívoca y en ocasiones incorrecta. El resultado es una atmósfera de miedo, incertidumbre y duda (FUD, por sus siglas en inglés). Los factores de FUD a los que apuntamos incluyen:

- *disponibilidad futura (o discontinuación) con base en controles para la proteccin del medio ambiente.
- *eficiencia
- *toxicidad
- *inflamabilidad, y
- *aumento de costos en el futuro.

Disponibilidad futura

El R-22 y el R-123 están programados para su discontinuación según el protocolo de Montreal y la implementacin de regulaciones nacionales. El protocolo demanda cesar su produccin para el 2030 en países industrializados y para el 2050 en los países en desarrollo. Además estipula fases de reduccin, como las sumas ponderadas de los ODP de todos los HCFC juntos. Las regulaciones nacionales imponen las mismas fechas límite mencionadas para usar en equipos nuevos, para la produccin o la importacin, y -en casos extremos- para todos los usos. Estas fe-

chas por lo general son muy anteriores o mucho más previas para el R-22, por su mayor nivel de ODP.

La principal preocupacin sobre los HCFC radica actualmente con las emisiones de R-141b y R-142b de su uso como agentes sopladores de espuma. Esta aplicacin es inherentemente emisiva, y sus ODP, 0,086 y 0,043, respectivamente, son altos para un HCFC. En contraste, el uso de refrigerantes en enfriadores produce muy bajas emisiones, y los ODP del R-22 y el R-123 son muy inferiores, de 0,034 y 0,012, respectivamente.

Rigurosos análisis muestran que el impacto del R-123 por el uso de refrigerante, en el agotamiento del ozono es insignificante, con una contribucin menor a 0,001% al nivel máximo. Posteriores estudios indican que sus ventajas ambientales sobrepasan su impacto en el ozono y justifican reconsiderar su discontinuación.

Aunque la justificacin científica para indultar el R-123 es fuerte, los aspectos políticos son más difíciles de predecir. Se permite la produccin por otras tres décadas (cuatro en los países en desarrollo) aun sin reconsideracin. Deberá haber cantidades de refrigerante suficientes para servir enfriadores nuevos y existentes de R-123 por algunas décadas más. Observe que la produccin de R-11 se interrumpió en países desarrollados en 1994 o antes, pero los inventarios de servicio siguen siendo elevados. El reciclaje de refrigerante de retiros y reemplazos de equipos, permitido por el protocolo de Montreal, deberá proporcionar cantidades más que adecuadas a costos accesibles. La clave es una restriccin y mantenimiento adecuados para reducir la cantidad de servicio necesario.

Los HFC no están controlados por el protocolo de Montreal, pues sus ODP son casi de cero. Las emisiones de HFC están reguladas por el protocolo de Kioto, pero este tratado no ha entrado en vigencia y puede no hacerlo a menos que se enmiende para dirigir las medidas en los países desarrollados.

La actual forma del protocolo de Kioto especifica metas de reduccin para emisiones basadas en un canasta con GWP ponderado de seis gases o grupos especificados, que incluyen los HFC. Estos representan una pequeña fraccin del total, pero son el componente que se incrementa a mayor velocidad.

No hay forma de predecir si en el futuro se incrementarán los topes específicos de produccin. Algunos países -principalmente en Europa- están inclinándose unilateralmente hacia las restricciones sobre e incluso las prohibiciones a algunos usos de los HFC. Los fabricantes de equipos han evitado el R-236fa en equipos nuevos debido a su alto nivel de GWP de 9.400 (en comparacin con 120 y 1.600 para el R-123 y el R-134a, respectivamente).

La figura 4 compara los ODP y GWP de importantes refrigerantes de un componente. Sugiere varios puntos dignos de destacar.

Primero, los CFC garantizaban control como supresores de ozono y emisores de gases de invernadero.

Segundo, sólo dos de los refrigerantes mostrados ofrecen a la vez ODP y GWP muy bajos; estos son el R-123 y el R-152a (un HFC). El R-152a hace combustión fácilmente y, por tanto, sólo se usa como refrigerante en forma de mezcla (principalmente en la serie R-401 de los fluidos de servicio y en el R-500).

Tercero, podría haber surgido un panorama muy diferente si se hubieran implementado medidas sobre el calentamiento global antes que para el agotamiento del ozono. El lado izquierdo -de los ODP- del diagrama muestra

Figura 4. Potencial de agotamiento del ozono (ODP) comparado con potencial de calentamiento global (GWP) para refrigerantes importantes de un solo componente: los CFC tienen por lo general ODP y GWP elevados. Los HCFC suelen tener ODP y GWP mucho más bajos. Los HFC ofrecen ODP cercanos a cero, pero algunos tienen GWP comparativamente altos.

porqué los artífices del protocolo de Montreal se centraron primero en los CFC, permitieron los HCFC como fluidos de transición y consideraron soluciones a largo plazo para los HFC. El lado derecho -de los GWP- sugiere una salida diferente si se hubiera tratado primero el calentamiento global. Probablemente se habrían considerado individualmente los compuestos en lugar de agruparlos en grandes grupos por su composición. Es muy probable que en tal caso, el R-123 hubiera sobrevivido al segundo recorte, para los ODP, con menores opciones restantes y reconocimiento de sus ventajas ambientales. Estas se discuten más adelante.

Dadas las convincentes razones a favor y la posibilidad de indulto para el R-123, y reconociendo que algunas partes están buscando controles más estrictos sobre los HFC, la industria de aire acondicionado y refrigeración necesita exponer claramente los argumentos para las determinaciones científicas. Estas requieren de evaluaciones integradas de todos los aspectos ambientales, teniendo en cuenta tanto los impactos favorables como los desfavorables.

· Eficiencia

· Casi cualquier sustancia volátil puede usarse como refrigerante. Más aún, diferentes fluidos pueden ofrecer el mismo coeficiente de desempeño con modificaciones de ciclo para propiedades de fluidos individuales. Sin embargo, el desempeño alcanzable difiere entre fluidos individuales en ciclos simples. Las diferencias son aun mayores en equipos prácticos.

· De los refrigerantes usados en nuevos enfriadores centrífugos, el R-123 ofrece una ventaja de 3 a 5% en la eficiencia teórica sobre los alternativos. Un sondeo realizado por el Instituto de Refrigeración y Aire Acondicionado (ARI) en noviembre de 1996 descubrió que el R-123 conservaba una ventaja de eficiencia de 9 a 20% para el mejor equipo disponible. Considerando desde entonces han ocurrido mayores mejoras de desempeño para el R-123 que para los otros refrigerantes, las diferencias han aumentado.

· Eso no implica que los enfriadores con R-123 siempre sobrepasen el desempeño de los otros, pues los rangos de eficiencias disponibles coinciden. Eso significa que los enfriadores con R-123 mantienen una clara ventaja cuando se buscan las mayores eficiencias.

· Esta ventaja de desempeño se manifiesta en importantes diferencias en el impacto de calentamiento equivalente total (TEWI, en inglés) o en el impacto del calentamiento en el ciclo de vida (LCWI), que expresa los efectos combinados de las emisiones de refrigerantes y los mayores efectos del uso de energía en términos de emisiones equivalentes de bióxido de carbono.

· La figura 5 compara los TEWI para los mejores enfriadores del mercado para cada refrigerante. Incluye emisiones a la torre eléctrica de enfriamiento y bombas comunes de agua para condensado. Se basa en los métodos de cálculo y datos de estudios publicados en «Equilibrios en selecciones de refrigerante: pasado, presente y futuro» (En Refrigerants for the 21 century, de Ashrae, 1997) e investigaciones previas citadas en aquel artículo. Los valores de GWP usados se tomaron de la última evaluación internacional. Como puede observarse, la discontinuación del R-123 aumentaría el impacto de calentamiento global neto para los mejores enfriadores en 14 a 20%.

· Toxicidad

· El R-22, el R-123, el R-134a y la mayoría de refrigerantes más comunes tienen una baja toxicidad dérmica aguda y de inhalación (una exposición por corto tiempo, como en escapes no planeados). Ninguno de ellos es carcinógeno, intoxicante reproductivo o de desarrollo, genotóxica o irritante respiratorio. La excepción es el R-717 (amoníaco), corrosivo a la piel y los ojos, y también irritante respiratorio, pero el olor alerta sobre escapes.

· Todos los citados, a excepción del R-717 (amoníaco) y el R-718 (agua) son sensibilizadores cardíacos. Todos pueden actuar como asfixiantes.

· De los mencionados, todos plantean riesgos ocupacionales muy bajos a los técnicos y otros que trabajan con o cerca de ellos, que generalmente se caracterizan como crónicos (por exposición repetida, a largo plazo). El R-123 es más tóxico que el R-22 y el R-134a, como se refleja en sus límites permisibles de exposición y por su clasificación de seguridad bajo el estándar 34 de ASHRAE (Designación y clasificación de seguridad para refrigerantes). El R-717 es aún más tóxico, pero ninguno de ellos se califica como «altamente tóxica» ni siquiera como «tóxica» en las regulaciones federales o la mayor parte de códigos locales de construcción (construcción, fuego y mecánica).

· Todos estos refrigerantes pueden usarse sin riesgo con un diseño adecuado de los equipos y el sistema, y adhiriéndose a las prácticas de servicio recomendadas. El estándar 15 de ASHRAE (Código de seguridad para refrigeración mecánica) y los códigos de construcción, fuego y mecánica identifican requerimientos de seguridad mínimos.

· Los índices de toxicidad por sí solos no describen el riesgo relativo. La mayoría de estos índices y límites de exposición se expresan como concentraciones en forma adimensional, ppm v/v (partes por millón por volumen) o equivalentes dimensionales (masa por volumen de unidad). Debido a las diferencias de volatilidades, las rupturas u otros escapes de las mismas cantidades de refrigerantes a presiones alta y baja producen distintas concentraciones transportadas por aire a temperatura ambiente. Con un punto normal de ebullición de 27,8°C, la mayor parte del R-123 se condensaría en el suelo en forma de líquido y la concentración transportada por el aire sería baja. Al contrario, el R-22 o el R-134a tendrían concentraciones iniciales mayores, pero se disiparían más rápidamente. Dado que la fuerza impulsora en un escape es la presión, la cantidad de refrigerante que escaparía por fugas del mismo tamaño sería mayor para refrigerantes a altas presiones que para fluidos a bajas presiones.

· Para la perspectiva, el R-123 es más seguro o sustancialmente más seguro que el R-11, que

lo reemplazó, por la mayor parte de medidas. El R-134a es uno de los refrigerantes menos tóxicos en el mercado. Aunque todos plantean riesgos si se usan inadecuadamente, la parte más peligrosa de trabajar en sistemas de refrigeración es llegar hacia y desde el lugar de trabajo. Los riesgos de muerte por exposición a un refrigerante, excluyendo el abuso intencional, es más de veinte veces menor que el de morir por la iluminación. Este registro debería mejorar con el actual uso de detectores de fugas de refrigerante y el seguimiento estricto de los estándares y códigos de seguridad actualizados.

Con respecto al debate de FUD -miedo, incertidumbre y duda-, el R-22 causó tumores malignos en ratas durante pruebas de toxicidad. Tanto el R-123 como el R-134a -este último sólo en concentraciones elevadas- ocasionó un aumento de la incidencia de tumores benignos (no malignos) en las ratas durante su fase final de vida, después de exposiciones crónicas. Las repetidas evaluaciones toxicológicas basadas en pruebas posteriores mecanicistas y otras han concluido que estos resultados son irrelevantes y no plantean riesgos inusuales en humanos. Los reclamos de un voluntario que murió y fue resucitado en pruebas con humanos para R-134a y R-227ea distorsionan grandemente lo que pasó. Las investigaciones subsecuentes hallaron que las reacciones se desataron por la forma en que se realizaron las pruebas, y no por la acción química. Múltiples pruebas en animales y humanos, con concentraciones mayores, así como exposiciones involuntarias, corroboran los hallazgos.

Inflamabilidad

Ninguno de los refrigerantes de enfriadores que se han citado, a excepción del amoníaco y los hidrocarburos, son clasificados como inflamables por las pruebas generalmente usadas para clasificar la seguridad del refrigerante. La inflamabilidad del amoníaco es moderada, y no hace combustión fácilmente. El R-123 y el R-236fa se usan comercialmente como extinguidores de fuego.

Con excepción del agua, todos los refrigerantes citados aseguran el mayor cuidado contra incendios debidos a fallas, que involucran aerosoles de los lubricantes del compresor en refrigerantes presurizados. Esta observación es particularmente válida para refrigerantes inflamables o con pocas capacidades de supresión de fuego.

Costos futuros

Una respuesta breve sobre los costos futuros de los refrigerantes es que no serán necesariamente elevados. El componente refrigerante de los costos totales del sistema o incluso los costos de los equipos es bajo. La alternativa estratégica para reducir los costos de los refrigerantes de servicio es minimizar la necesidad de reposición. Las claves para ello son pruebas en campo y sitio de fabricación en

búsqueda de escapes en equipos nuevos, adherencia a las recomendaciones del fabricante en cuanto a mantenimiento preventivo y prácticas de servicio, capacitación de técnicos y rápida respuesta a indicadores de fugas. Esto incluye la necesidad de añadir refrigerante, el uso de detectores de fugas y mayor tiempo de ejecución de purgas.

Las guerras de los enfriadores

Este término describe las campañas de mercadeo, o campañas FUD, que emergieron en los 90 basadas en la selección de refrigerantes y equipos.

Cada aplicación de enfriador garantiza una evaluación para determinar factores únicos, pero algunas generalizaciones pesan más. Los comentarios que siguen responden a algunos FUD propugnados en mercadeo.

Los diseños de baja presión ofrecen por lo general menores costos, particularmente para enfriadores con alta eficiencia. Requieren dispositivos de purga para remover el aire que se cuela en ellos, pero la operación subatmosférica reduce las pérdidas de refrigerante (hay ingreso de aire en vez de salida de refrigerante). Las aseveraciones de que la purga de aire (descarga del aire removido) también libera refrigerante hace tiempo ya que son cosa del pasado. La afirmación es anterior a las pérdidas casi nulas de las actuales purgas de condensado, y especialmente las que usan un carboncillo u otra caja de recuperación.

Los enfriadores de alta presión son a menudo más compactos, para facilitar los reemplazos donde hay poco espacio o limitado acceso. Por lo general ofrecen un equipo más bajo -no en operación- en costo para diseños de baja eficiencia.

El R-22, el R-123 y el R-134a son todos ellos alternativas aceptables. Aunque los diseños de R-22 serán la siguiente clase en retirarse, los suministros almacenados de R-22 y las cantidades recicladas deberán satisfacer las necesidades de mantenimiento para enfriadores nuevos y existentes durante muchos años. Las opiniones de que los usuarios enfrentarán cortes o se verán obligados a plegarse ante precios muy elevados son exageradas. Al igual que para el R-11, el R-12 y otros CFC o mez-

Figura 5. Emisión de gases de invernadero (expresadas en equivalentes de bióxido de carbono) por unidad de enfriamiento al año -TEWI- para los mejores enfriadores del mercado en dos capacidades representativas.

clas con CFC (como el R-500 y el R-502), las claves son ajustar los sistemas para minimizar las pérdidas, mejorando las prácticas de servicio y administrando los inventarios actuales incluyendo los que están en uso. Estas medidas son esenciales para todos los refrigerantes, no sólo para los que ven más cercana la discontinuación de producción.

El R-717 (amoníaco) también amerita consideración. Es un excelente refrigerante en aplicaciones apropiadas. Ejemplos de esto lo constituyen los procesos industriales, como el de procesamiento y almacenamiento de alimentos y bebidas, y la refrigeración de pistas de hielo. El amoníaco no es adecuado para sitios en que los escapes accidentales podrían amenazar la seguridad pública.

Los enfriadores de ciclo de absorción son mayores y más costosos, pero ofrecen costos de operación menores cuando se accionan por calor que de otro modo se perdería o calor o combustible de bajo costo. También ofrecen una estrategia para reducir los gastos por demanda eléctrica pico si ello genera preocupación. Las eficiencias de los enfriadores de absorción son comparativamente menores que las de sus contrapartes de vapor-compresión, lo que produce elevados o mucho más elevados TEWI o LCWE en la mayor parte de lugares y aplicaciones.

Hay un viejo dilema sobre un vidrio parcialmente lleno. El filósofo discute si aquél está parcialmente lleno o en parte vacío; el ingeniero piensa que el vidrio es demasiado grande para lo que se necesita. Las verdades a medias en refrigerantes deberían evocar una respuesta similar. La respuesta no es si son parcialmente correctas o en parte incorrectas, sino que aquellas por lo general no responden la pregunta apropiada.

Futuros refrigerantes para enfriadores

En los próximos años, los diseños más recientes con R-134a, R-407C, R-410A, otras mez-

clas o R-717 (amoníaco) reemplazarán el R-22. El R-134a permanecerá en uso, y dominará el limitado mercado que demanda grandes capacidades, donde los enfriadores exceden los 15 MW_t (4.300 ton).

La difícil transición será para los reemplazos del R-123, pues todas las alternativas que se han identificado afectan el desempeño y/o la seguridad. La solución más viable sería eximir el R-123 de la discontinuación bajo el protocolo de Montreal y las regulaciones nacionales. Esta exención se restringiría a la producción para usarlo como un refrigerante de enfriadores. La justificación científica para eximirlo es sólida, pues el impacto del R-123 en el ozono de la estratosfera en inidentificable, su beneficio en la reducción del calentamiento global es significativa, y su tiempo de vida en la atmósfera se sitúa entre las más cortas de todos los refrigerantes.

El R-245fa ofrece el potencial para aproximarse a las eficiencias del R-123 en grandes capacidades, 3-15 MW_t (850-4.300 ton), con uso de compresores de múltiples etapas. Aún es incierta su comercialización como refrigerante. Este uso dependerá de una buena aceptación en el mercado como agente soplador de espuma, con el fin de alcanzar niveles de producción asequibles. Aun así, el R-245fa

puede llegar a costar más que los otros refrigerantes, debido al proceso de fabricación que implica. El factor decisivo para los fabricantes de equipos puede ser el aseguramiento de su disponibilidad a largo plazo.

El uso sugerido de R-601 (n-pentano), R-601a (isopentano) o mezclas de ellos sería excepcionalmente peligroso. Estos hidrocarburos son altamente inflamables y las cantidades de carga requeridas para enfriadores centrífugos podrían provocar grandes explosiones. Aún más, la operación subatmosférica es susceptible de tener ingreso de aire y la posibilidad de explotar cuando se comprime. Más allá de los problemas de seguridad, ni los hidrocarburos ni el R-717 (amoníaco) igualan la eficiencia del R-123 en las condiciones de operación de un enfriador.

Conclusiones

Gran parte de la actual ansiedad en torno a las selecciones de refrigerante es injustificada. Los ingenieros, dueños de edificios y otros involucrados en las decisiones sobre los enfriadores deberían regresar a las especificaciones tradicionales de enfriadores con base en el costo, el desempeño, el apoyo del fabricante local, las opciones de servicio y la confiabilidad. Al anticiparse a regulaciones ambientales más exigentes, también deberían

emprender todos los pasos prácticos para reducir las emisiones de refrigerante y aumentar la eficiencia.

Las campañas de FUD han retardado el reemplazo de equipos más viejos, menos eficientes y propensos a escapes y fallas. Ese resultado perjudica el medio ambiente, aumenta los costos y contiene el mercado de enfriadores.

Reconociendo que no existen refrigerantes ideales y que no hay posibilidad de descubrir alguno, todos los implicados deben insistir en la determinación científica de la aceptabilidad en lugar de aceptar la manipulación del mercado. Si esto falla, el debate al interior de la industria invitará a retornar a opciones menos seguras que exacerbarán el cambio climático. Tales opciones también limitarán otros problemas que se avecinan, como la carga de nitrógeno, por medio una menor eficiencia y el requerimiento resultante de un uso de energía más elevado. ☐

Jim Calm es consultor de ingeniería, puede contactarlo en jmc@JamesMCalm.com

©James M. Calm. Este trabajo fue presentado por Jim Calm en el Earth Technologies Forum, que se realizó en Washington D.C. entre octubre 30 y noviembre 1 del 2000.