

La próxima generación de refrigerantes

por James M. Calm, Consultor de Ingeniería

J. M. Calm, "The Next Generation of Refrigerants," paper ICR07-B2-534, *Refrigeration Creates the Future* (proceedings of the 22nd International Congress of Refrigeration, Beijing, People's Republic of China, 21-26 August 2007), translated as "La próxima generación de refrigerantes" in *ACR-Latinoamérica*, 11(6):20-29, November-December 2008 and 12(1):18-25, January-February 2009

© Copyright 2007, James M. Calm, Engineering Consultant

La próxima generación de refrigerantes (I)

Este documento hace una revisión de la evolución de los refrigerantes desde su uso más antiguo hasta la actualidad, y luego aborda las directrices y candidatos futuros. El artículo divide la historia en cuatro generaciones. Se discuten también el desplazamiento de los primeros fluidos de trabajo y la forma como volvió a surgir el interés por algunos de los primeros refrigerantes; por ejemplo, el interés renovado en aquellos que se identifican actualmente como “naturales”.

También se examina en este documento una visión general de las opciones actuales en los contextos de acuerdos internacionales existentes, incluyendo los protocolos de Montreal y Kioto para prevenir el agotamiento del ozono estratosférico y el cambio climático mundial, respectivamente. Además hace una evaluación de las preocupaciones ambientales y otras medidas de control tanto locales como in-



La refrigeración natural se remonta a tiempos antiguos en los que se utilizaba hielo almacenado, vaporización de agua y otros procesos evaporativos

En la primera entrega de este artículo se realizará un recorrido por la evolución de los refrigerantes a través de la historia.

ternacionales. Asimismo muestra cómo la atención aislada a los problemas ambientales individuales o requerimientos regulatorios, en contraste con las respuestas coordinadas a los diferentes asuntos conjuntos, puede dar como resultado un daño ambiental inesperado que requerirá casi con certeza futuras revocaciones.

Evolución de los refrigerantes

La refrigeración natural se remonta a tiempos antiguos en los que se utilizaba hielo almacenado, vaporización de agua y otros procesos evaporativos. Numerosos investigadores en diferentes países estudiaron la física del cambio de fase en los años 1600 y 1700; sus principales hallazgos establecieron las bases para la refrigeración "artificial" (fabricada por el hombre). Oliver Evans propuso inicialmente el uso de un fluido volátil en un ciclo cerrado para congelar agua y convertirla en hielo (Evans, 1805).

También describió un sistema que producía refrigeración evaporando éter bajo un vacío, y luego bombeaba el vapor a un intercambiador térmico refrigerado con agua para que se condensara y fuera reutilizado. Aunque no existen registros de que él hubiera construido una máquina que funcionara, sus ideas probablemente influenciaron tanto a Jacob Perkins como a Richard Trevithick.

Este último propuso un sistema de ciclo de aire para refrigeración en 1828, pero no lo construyó. Sin embargo, Perkins sí lo hizo con su invención de la máquina de compresión de vapor en 1830 e introdujo así los verdaderos refrigerantes, tal como los conocemos hoy en día.

Su patente describe un ciclo utilizando un "fluido volátil con el objetivo de producir la refrigeración, la congelación y condensar al mismo tiempo dichos fluidos para ponerlos en operación sin que se presentaran desechos" (Perkins, 1834). Muchos expertos en refrigeración reconocen su histórica contribución a la identificación de este método mecánico de compresión de vapor como "El Ciclo Perkins".

Aunque fue diseñado para utilizar éter sulfúrico (etilo) como refrigerante, las primeras pruebas se realizaron realmente con caoutchoucine, un solvente industrial que Perkins utilizó y que por lo tanto tenía disponible en su negocio. La figura 1 muestra la evolución de los refrigerantes desde

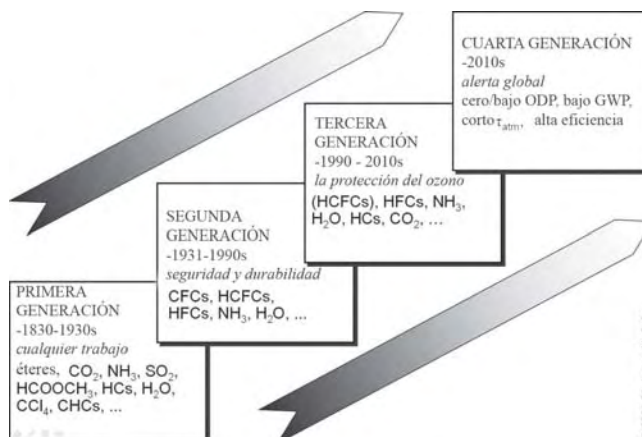


Figura 1

su advenimiento y hasta cuatro generaciones posteriores.

Primera generación: los que funcionaran

Los refrigerantes más comunes durante los primeros cien años fueron solventes familiares u otros fluidos volátiles; constituyeron la primera generación de refrigerantes "los que funcionaran" y "los que estuvieran disponibles". Casi todos eran inflamables, tóxicos o ambas cosas, y algunos también eran altamente reactivos. Los accidentes eran

comunes. Para tener una perspectiva, un número de compañías comercializaron el propano (R-290) como el "refrigerante seguro y sin olores" para promocionarlo sobre el amoníaco (R-717) (CLPC, 1922).



Oliver Evans



Willis H. Carrier

Una histórica y efectiva publicidad indicaba que el propano "es un químico neutral; por consiguiente, no se presentan acciones corrosivas" y "no es nocivo ni desagradable, si la ocasión lo requiere, el ingeniero puede trabajar en el vapor sin ningún tipo de inconvenientes" (CLPC, 1922). La continua preferencia, incluso actual, del amoníaco sobre los hidrocarburos en aplicaciones industriales, sugiere que la alta inflamabilidad fue y sigue siendo una gran preocupación en los grandes sistemas.

La primera búsqueda sistemática y documentada de un refrigerante que ofreciera un diseño práctico con desempeño mejorado llegó alrededor de 1920, con el examen de los refrigerantes para enfriadores (Carrier y Waterfill, 1924). Willis H. Carrier, conocido por sus avances en psicometría y acondi-

cionamiento de aire, y R.W. Waterfill, investigaron un rango de candidatos para su adecuación en máquinas de compresión centrífuga (turbo radial) y de desplazamiento positivo, con énfasis en el desarrollo de la compresión centrífuga.

Concluyeron (sin análisis de los ciclos trans-críticos) que el desempeño del dióxido de carbono (R-744) dependería del ciclo y la cantidad de sub-refrigeración de líquido, pero que esto conduciría al menor desempeño pronosticado de los fluidos analizados. También anotaron que el amoníaco y el agua (R-718) requerirían excesivas etapas para los compresores centrífugos y para las condiciones observadas, y que el agua "aporta una baja eficiencia de desempeño". Rechazaron el dióxido de sulfuro (R-764) por motivos de seguridad y el tetracloruro de carbono (R-10) por su incompatibilidad con los metales, especialmente en presencia del agua. Finalmente, seleccionaron el dieleno (1,2-dicloroetano, R-1130) para la primera máquina centrífuga, aunque esta selección requirió luego de una búsqueda internacional para encontrar una fuente (Ingels, 1952).

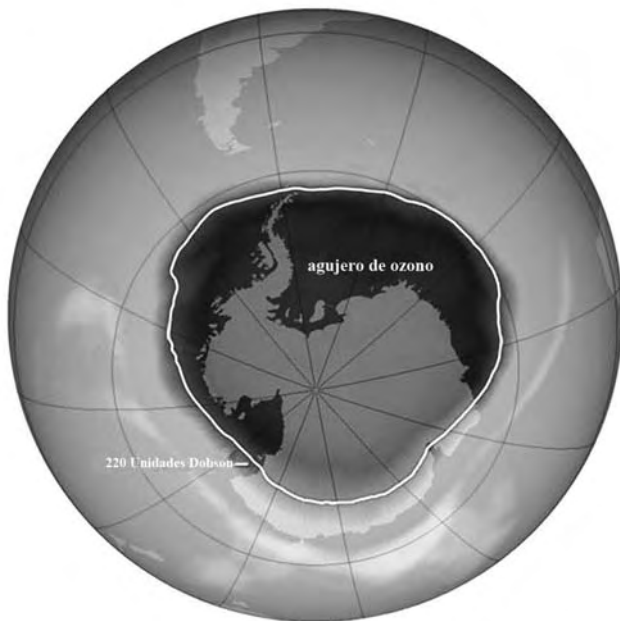
Segunda generación: seguridad y durabilidad

La segunda generación se distinguió por un cambio hacia los fluoroquímicos por su seguridad y durabilidad. Las repetidas fugas, de los entonces prevalentes formatos de metilo (R-611) y dióxido de azufre (R-764), retrasaron los primeros esfuerzos para comercializar los refrigeradores.

Con la instrucción de que "la industria de refrigeración necesita un nuevo refrigerante, si ellos esperan obtenerlo en cualquier parte", Thomas Midgley, Jr. y sus asociados Albert L. Henne y Robert R. McNary, buscaron por toda la tabla de propiedades para encontrar químicos con el punto de ebullición deseado. Ellos restringieron la búsqueda para escoger los conocidos como estables, pero que no fueran

tóxicos ni inflamables. El punto de ebullición publicado para el tetrafluoruro de carbono (R-14) dirigió la atención a los fluoruros orgánicos, pero sospecharon correctamente que la temperatura real de ebullición era mucho más baja que la publicada. Volviendo a la tabla periódica de los elementos, Midgley eliminó rápidamente aquellos que producían volatilidad insuficiente.

Luego, eliminó los que resultaban en compuestos inestables y tóxicos, así como los gases inertes, con base en sus bajos puntos de ebullición. Solamente quedaron ocho elementos, a saber, carbono,



nitrógeno, oxígeno, azufre, hidrógeno, flúor, cloro y bromo (Midgley, 1937). Después de tres días de haber iniciado, en 1928, Midgley y sus colegas hicieron observaciones importantes con respecto a la inflamabilidad y toxicidad de los compuestos que tenían estos elementos.

También anotaron que cada refrigerante conocido, combinaba a la vez solo siete de esos elementos (todos excepto el flúor). Su primera publicación sobre refrigerantes fluoroquímicos muestra cómo la variación de la cloración y la fluoración de hidrocarburos influye en los puntos de ebu-

llición, la inflamabilidad y la toxicidad (Midgley, 1930).

La producción comercial de R-12 comenzó en 1931, seguida del R-11 en 1932 (Downing, 1966 y 1984). Los clorofluorocarbonos (CFCs) y luego (especialmente a comienzos de los años 1950 en acondicionadores de aire y bombas de calefacción) los hidroclorofluorocarbonos (HCFCs) dominaron la segunda generación de refrigerantes. El amoníaco siguió siendo (y lo es actualmente) el refrigerante más popular en sistemas grandes a escala industrial, especialmente para el procesamiento y almacenamiento de alimentos y bebidas.

Tercera generación: protección del ozono

La unión de los CFCs liberados (incluyendo los refrigerantes CFC) para el agotamiento de la capa de ozono catalizó la tercera generación con un enfoque en la protección del ozono estratosférico. La Convención de Viena y el resultante Protocolo de Montreal obligó a terminar con el uso de las sustancias agotadoras del ozono (ODS). Los fluoroquímicos conservaban el primer enfoque, con énfasis en los HCFCs para uso transicional y los hidrofluorocarbonos (HFCs) para un tiempo más prolongado. Los cambios produjeron un renovado interés en los "refrigerantes naturales" (particularmente el amoníaco, el dióxido de carbono, los hidrocarburos y el agua), junto con el mayor uso de la absorción y otros métodos (los que no utilizan sistemas de compresión de vapor con refrigerantes fluoroquímicos). Los programas de investigación públicos y privados examinaron sistemáticamente tanto los candidatos adicionales no fluoroquímicos como el hidrofluoroeter (HFE), pero representaban pocas opciones promisorias.

Los fabricantes comercializaron los primeros refrigerantes alternativos a finales de 1989 y, en los siguientes 10 años, introdujeron reemplazos para la mayoría de las sustancias agotadores del ozono. Los países no incluidos en el artículo 5 (la mayoría de ellos desarrollados) eliminaron gradualmente el uso de refrigerante CFC en los nuevos equipos hacia el año 1996, tal como lo había requerido el Protocolo de Montreal.

Los países incluidos en el artículo 5 lo harán hacia el año 2010. La distinción del "artículo 5" se relaciona con el nivel de uso anterior de sustancias agotadoras del ozono, tal como fue definido en el protocolo. Excepto por lo restringido por las regulaciones nacionales, el uso y servicio continuos siguen siendo permitidos para los equipos existentes que utilizan refrigerantes CFC, hasta que sean retirados de otra forma.

La transición desde los HCFCs también está en proceso. El Protocolo de Montreal limita la producción de los HCFCs por etapas en 1996, 2004, 2010, 2015 y 2020, con una eliminación total en el 2030 en los países no incluidos en el artículo 5, e impone una reducción a comienzos del 2016 y la cesación de la producción en el 2040 en los países incluidos en el artículo.

Los países adoptaron diferentes métodos de respuesta; la mayoría de países de centro y occidente de Europa aceleraron la eliminación gradual de los HCFC, mientras que los otros países desarrollados establecen límites, eliminando gradualmente los usos del propulsor y el agente de soplado (especialmente el R-141b) inicialmente, lo que requiere la eliminación gradual del R-22 (el refrigerante más utilizado actualmente) hacia el 2010, y luego la prohibición del uso de HCFC en los nuevos equipos hacia el 2020. La programación para los países incluidos en el artículo 5 comienza con un congelamiento en el 2016 y termina con la eliminación gradual hacia el 2040. Nuevamente, los futuros usos y servicios continuados se permiten para los equipos existentes que emplean refrigerantes HCFC, hasta que sean retirados de otra forma, excepto por lo restringido por las regulaciones nacionales.

Aunque ya se discutió aquí como producción, el Protocolo de Montreal realmente regula el consumo, el cual define como producción más importaciones menos exportaciones y destrucción especificada. Como resultado, las exportaciones desde los países incluidos en el artículo 5 hacia los países no incluidos en el artículo 5, se restringen efectivamente para cumplir con los exigentes programas.

Para evitar productos separados domésticos y de exportación y para explotar nuevas tecnologías derivadas de *joint ventures* (uniones de empresas con riesgos compartidos) y acuerdos de licencia, algunos productos en los países del artículo 5 incorporan los reemplazos antes de lo requerido.

Tres puntos garantizan la notificación. Primero, los refrigerantes constituyeron históricamente solo una pequeña fracción de las emisiones totales de ODS, pero la mayoría de los mismos CFCs y algunos de los HCFCs de uso común como refrigerantes, también se utilizaban en muchas más aplicaciones emisivas, como propulsores de aerosol, agentes para el soplado de espuma y solventes.

Segundo, y al menos comparable en importancia con los reemplazos de refrigerantes, es que las preocupaciones ambientales inspiraron los principales cambios en diseño, fabricación, instalación, servicio y los procedimientos de disposición final para reducir emisiones evitables (Calm, 2002).

En tercer lugar, la capa de ozono se está recuperando, a pesar de los informes de episodios de los orificios de ozono en la Antártica. El tamaño del orificio de la Antártica cada año resulta de factores variables tales como los vientos y oscilaciones polares del sur, lo cual induce el vórtice polar, y las severas temperaturas de invierno que regulan las eficiencias de la destrucción del ozono y la restauración natural. Las evaluaciones científicas internacionales documentan que tanto las nuevas liberaciones de ODS como las emisiones residuales anteriores están reduciéndose (WMO, 2006). Los científicos interpretan las tendencias de concentración mínima de ozono y área mínima de ozono que se muestran en la Figura 2, como una estabilización en los años recientes y el inicio de una recuperación, ya que ambas medidas alcanzaron sus peores niveles en 1998.

El progreso en la recuperación del ozono es incluso más evidente cuando se

mide a través del ozono promedio global en lugar del ozono en el vórtice aislado de la Antártica.

Aunque el aumento de las emisiones de ODS pudiera agudizar el agotamiento del ozono y prolongar o precluir la recuperación, las oportunidades de acelerar la recuperación de la capa de ozono son mucho más limitadas, espe-

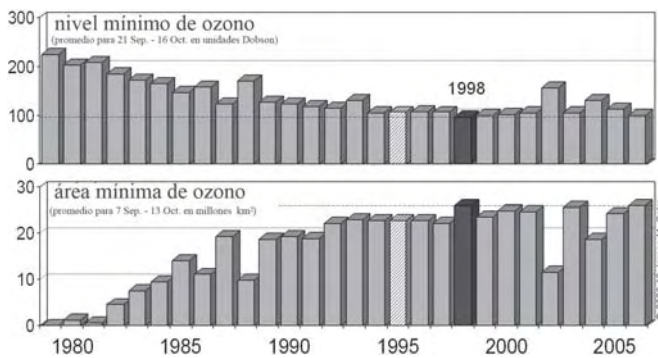


Figura 2

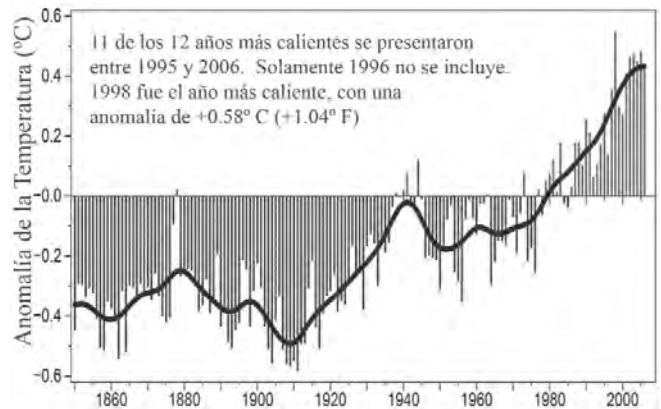


Figura 3

cialmente si consideramos la enorme influencia de los CFCs, halógenos y otras ODSs liberadas en el pasado y que tuvieron largas duraciones.

Este punto sugiere una consideración focal del tiempo de duración en la atmósfera (t_{atm}) en la selección de alternativas, para evitar una repetición de acumulación atmosférica antes del descubrimiento de nuevas preocupaciones que puedan surgir en el futuro.

Cuarta generación: calentamiento global

La respuesta exitosa al agotamiento del ozono contrasta altamente con la situación de deterioro con el cambio climático, tal como se muestra en la Figura 3. Los nuevos hallazgos y el debate político del calentamiento global se han vuelto eventos del diario vivir, especialmente en los meses recientes. El Cuarto informe de evaluación (AR4) del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) refleja el más reciente consenso científico que establece que "el calentamiento del sistema climático es inequívoco, como actualmente es evidente por las observaciones de los incrementos en el aire promedio global y las temperaturas oceánicas, el gran derretimiento de la nieve y el hielo y el creciente promedio global del nivel del mar" (IPCC, 2007).

La evaluación concluyó que "la mayoría del incremento observado en las temperaturas promediadas globalmente desde mediados del siglo 20 se debe muy probablemente al incremento observado en las concentraciones antropogénicas de gas de invernadero" y que "las discernibles influencias humanas se extienden actualmente a otros aspectos del clima, incluyendo calentamiento oceánico, temperaturas continentales promedio, temperaturas extremas y patrones de vientos" (IPCC 2007).

El Protocolo de Kioto, de acuerdo con la Convención Inter-

nacional sobre Cambio Climático, establece el cumplimiento obligatorio de los objetivos para las emisiones de gas de invernadero, con base en equivalentes calculados de dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, HFCs, perfluorocarbonos (PFCs) y hexafluoruro de azufre.

No habla de las ODSs cubiertas por el Protocolo de Montreal, aunque algunas también son GHGs muy potentes. Las leyes y regulaciones nacionales para implementar el Protocolo de Kioto difieren, pero generalmente prohíben las emisiones evitables de refrigerantes HFC y PFC y, en algunos países, controlan o imponen impuestos a su uso. Las medidas más recientes (adoptadas o propuestas) a nivel regional, nacional, estatal y municipal son más estrictas. Estas restricciones están forzando cambios para una cuarta generación de refrigerantes definida por su enfoque en el calentamiento global.

El Parlamento Europeo estableció la regulación de tiempo con una directriz que prohíbe los refrigerantes fluoroquímicos (Gas F) que tengan GWP (potencial de calentamiento global) por encima de 150 para integración de 100 años en acondicionadores de aire para automóviles de modelo nuevo, efectivo a partir del 2011, y para todos los automóviles nuevos, a partir del 2017. Las regulaciones adoptadas también requieren una inspección periódica de sistemas de papelería que utilizan HFCs.

El Parlamento de la UE rechazó las medidas recomendadas que prohibieran HFCs como los propulsores de aerosol hacia el 2006, como los agentes de soplado de espuma hacia el 2009, y como refrigerantes en acondicionadores de aire y refrigeración hacia el 2010. El voto contencioso sobre el último ítem fue de 262-368, más del 40% a favor. Este significativo nivel de apoyo invita a una futura reconsideración, especialmente con los recientes hallazgos científicos en relación con el comienzo del cambio climático, que cada vez es más rápido y más severo. El efecto inmediato de estas mediciones es una prohibición sobre el R-134a en su más grande aplicación y,

como refrigerante, en su mayor aplicación emisiva (acondicionadores de aire móviles).

El límite de GWP adoptado permite intencionalmente una consideración de los HFCs de bajo GWP (notablemente el R152a, aunque inflamable). Las medidas del Gas F también sancionan regulaciones nacionales más estrictas, algunas de las cuales prohíben los HFCs en sistemas grandes, explícitamente prohíben el uso de HFC en enfriadores, o imponen impuestos indirectos de acuerdo con la carga del GWP en refrigerantes HFC. Los gremios en Europa están presionando por la adopción de medidas más estrictas para restringir las emisiones de gases de invernadero.

Un número de estados y ciudades en los Estados Unidos de América han propuesto restricciones sobre las emisiones de GHG, ya sea individualmente o regionalmente, aunque los impactos específicos sobre los HFCs individuales son inciertos. California, un estado que generalmente es pasivo y que tiene la mayor población, aprobó una legislación a finales del 2006, con la que se impone un capítulo de emisiones único en la nación sobre servicios públicos, refinerías y plan-

tas de manufactura, con el único objetivo de recortar las emisiones de gases de invernadero y lograr las registradas en 1990 en el 2020. La ley requiere que el ente regulador estatal determine los requerimientos reales, para incluir probablemente las medidas para los sistemas de refrigeración y acondicionadores de aire de automóviles.

Al menos otros ocho estados están propensos a seguir la iniciativa de California, si realmente regula los usos o emisiones de HFC. Un número de estados del nororiente y del atlántico medio se unieron en un pacto en 2007 para imponer capítulos sobre emisiones de plantas de energía y promover la comercialización de permisos entre las empresas de servicios públicos, y los gobernadores de cinco estados acordaron en el 2007 la Iniciativa Regional Occidental de Acciones Climáticas, con objetivos similares. ■

Espere en la próxima edición de ACR LATINOAMÉRICA la segunda parte de este artículo.

**Consultor de Ingeniería*

Correo electrónico: jmc@jamesmcalm.com

La próxima generación de refrigerantes (II)

Recuento: en la primera parte de este artículo se realizó una revisión de la evolución de los refrigerantes desde su uso más antiguo hasta la actualidad dividiendo la historia en cuatro generaciones. Mientras que en esta entrega se intentará abordar las directrices y candidatos futuros.

Próxima generación de refrigerantes

Los fabricantes de refrigerantes respondieron rápidamente a la directiva sobre el Gas F, con anuncios de nuevos refrigerantes. Al menos tres fabricantes multinacionales reportaron un desarrollo propio de innovadores refrigerantes para cumplir con el límite de GWP de 150 (DuPont, 2006; Honeywell, 2006; e INEOS Fluor, 2006). Considerando el valor tan grande de mercado de las ventas de refrigerantes



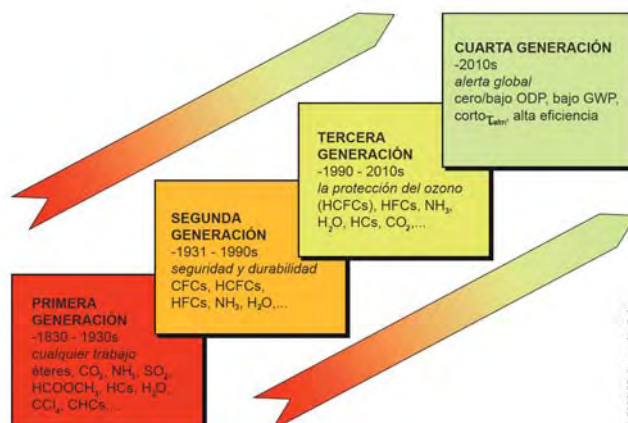
La segunda entrega de este artículo aborda las perspectivas a futuro de los refrigerantes.

automotrices, es seguro asumir que la mayoría de compañías están buscando soluciones, especialmente ahora que algunas de las mayores empresas están registradas a la espera de cumplir con las normas sobre el Gas F.

Estas entidades han publicado datos preliminares sobre ambiente, seguridad y desempeño, pero están restringiendo la divulgación total de las composiciones de refrigerantes por motivos competitivos, ya que las formulaciones finales todavía siguen siendo perfeccionadas y porque todavía no existen datos definitivos. Algunas de las principales patentes presentan una idea sobre las sustancias consideradas, ya sea individualmente o como componentes combinados (por ejemplo, Singh et al., 2005, y Mnor et al., 2006).

Las patentes sugieren que algunos candidatos y usos pueden requerir compatibilizadores (como los aditivos anti-espuma o los desactivadores de superficie metálica), estabilizadores (como los inhibidores de oxidación), solubilizadores de lubricantes u otros aditivos.

Algunos de los fabricantes, sino todos, anticipan que las soluciones o variantes de las soluciones identificadas para sa-



tisfacer los requerimientos del Gas F tendrán un mayor potencial de aplicación. DuPont (2006), Minor et al. (2006), y Singh et al. (2005) identifican específicamente mayores oportunidades de aplicación tanto para refrigerantes en sistemas estáticos de refrigeración y acondicionamiento de aire como para aplicaciones de extinción de fuego y agentes para el soplado de espuma. La facilidad que se percibe (sin un compromiso aparente en seguridad, durabilidad o eficien-

cia), ocultó enormes inversiones para desarrollar los refrigerantes de tercera generación y lubricantes asociados, para optimizar y construir plantas de manufactura, para modificar y calificar diseños de equipos y componentes (especialmente compresores) y para capacitar técnicos de instalación, operación y mantenimiento. Las rápidas y muy optimistas respuestas al límite de GWP del Gas F para refrigerantes automotrices (el inicio de la próxima generación), representan una señal para los reguladores en el sentido de que existen opciones de refrigerantes que cumplen con más metas ambientales sostenibles, en lugar de involucrarse en los actuales Protocolos de Montreal y Kioto.

Sin embargo, cuatro puntos muy importantes deben tenerse en cuenta. Primero, los fabricantes habían examinado previamente e incluso realizaron pruebas limitadas de los principales refrigerantes de reemplazo. Los registros documentan específicamente las pruebas de refrigerantes sin ODS para reemplazar los CFCs, por ejemplo el uso continuo del R-134a en refrigeradores domésticos, más de diez años antes del Protocolo de Montreal (Dupont, 1988). Excepto como componentes combinados (como el R-152a en R-500 y el R-23 en R-503), la indus-

tria evitó los refrigerantes de HFC, basada en las consideraciones de lubricantes antes de la eliminación gradual de ODS, aunque eran reconocidos como candidatos a comienzos de 1928.

Segundo, los refrigerantes de reemplazo generalmente son menos eficientes que las opciones anteriores. Con pocas excepciones, las ganancias de eficiencia que se logran en la maquinaria que utiliza los refrigerantes alternativos se derivan principalmente de las mejoras en el diseño de los equipos en lugar de las propiedades de los más nuevos fluidos de trabajo. Diciéndolo en forma sencilla, la mejor optimización con los antiguos refrigerantes habría producido incluso mayor eficiencia en la mayoría de los casos y los refrigerantes alternativos reducen los márgenes para mejoras adicionales en la eficiencia del producto.

Tercero, ninguno de los actuales refrigerantes candidatos es ideal y el futuro descubrimiento de refrigerantes ideales es extremadamente improbable (Calm y Didion, 1997). Las intensas restricciones obligan a adquirir nuevos compromisos entre los diferentes ob-

jetivos ambientales, de seguridad, de desempeño, de costos, y otros; no amplían las opciones finitas disponibles. Y en cuarto lugar, la atención secuencial a los problemas ambientales individuales arriesga la eliminación de importantes (o incluso críticas) opciones para soluciones generales equilibradas, con base en el menor impacto (o incluso insignificante) en los pro-

blemas individuales (Wuebbles y Calm, 1997).

Equilibrio entre las diferentes metas ambientales

Con los nuevos refrigerantes surgen preguntas interesantes sobre el equilibrio entre los contradictorios objetivos ambientales y entre las metas ambientales y la seguridad o compatibilidad. La eliminación gradual de ODS reduce las opciones de tratar el cambio climático a partir de consecuencias directas o indirectas tales como las emisiones relacionadas con energía. Dos ejemplos son las contradictorias metas para el R-131I (CF₃I, un fluoro-yodocarbono, FIC) como componente potencial en refrigerantes automotrices de bajo GWP (Singh et al., 2005) y el R-123 (un HCFC) como refrigerante de enfriadores (Calm, 2006).

Estos dos refrigerantes ofrecen una corta duración en la atmósfera, bajo nivel de GWP, baja toxicidad aguda por inhalación y no es inflamable. Ambos son efectivos supresores de fuego. Sin embargo, ambos tienen bajo nivel (pero no cero) de ODP, entre 0.011 y 0.018 (modelado), dependiendo de la latitud o la altitud de liberación para el R-131I y 0.02 semi-empírico (0.012 modelado) para el R-123*. El R-131I ofrece potencial como componente mezclado en combinación con olefinas fluoradas (alquenos no saturados) para suprimir su inflamabilidad, minimizando tanto el ODP como el GWP. A pesar de ser una ODS, aunque con un nivel muy bajo de ODP, el R-131I no está controlado por el Protocolo de Montreal ya que no se encontraba en uso comercial en 1992, que fue la última vez en que las sustancias fueron agregadas al Protocolo.

El R-123 es el refrigerante más eficiente para enfriadores de agua, diferente al R-11 y el R-141b (UNEP, 2007a), los cuales tienen niveles significativamen-

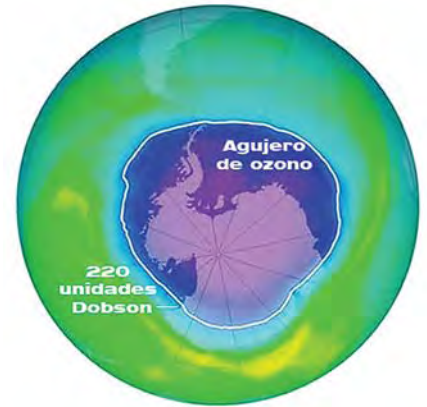
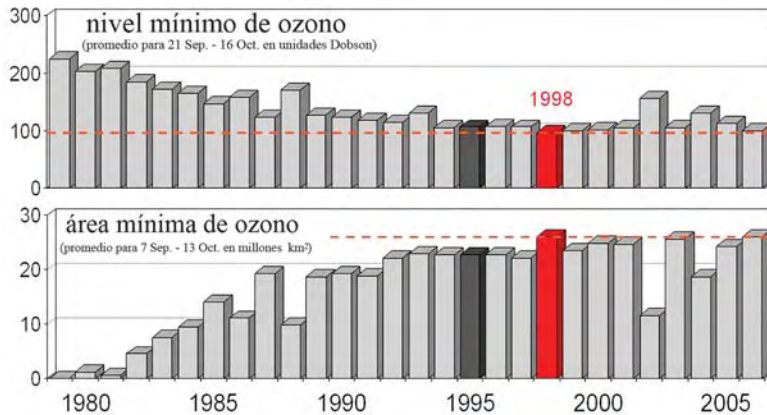


Figura 2. El calentamiento global continua siendo una de las mayores preocupaciones del mundo.

te mayores de ODP y mayores niveles de GWP. Aún así, el R-123 seguía en eliminación en Europa como una ODS y su eliminación gradual está programada, excepto por algunas reconsideraciones, en los nuevos enfriadores hacia el 2020 en los países no incluidos en el artículo 5 y hacia el 2040 en países incluidos en el artículo 5. El R-123 tiene un impacto general muy bajo en el ambiente debido a su bajo nivel de ODP, a su muy bajo nivel de GWP, a su muy corta duración en la atmósfera, a las muy bajas emisiones en los actuales diseños y a su eficiencia (UNEP, 2007a).

El Protocolo de Montreal permite una producción limitada para las necesidades de servicio hasta el 2030 en los países no incluidos en el artículo 5. No impone límite en ninguna parte para el uso y servicio continuados de los equipos existentes o los refrigerantes almacenados o recuperados. Estos ejemplos ilustran las claras contradicciones en los obje-

tivos ambientales para tratar el agotamiento del ozono y el cambio climático. Al menos una evaluación reciente sugiere una reconsideración de las anteriores propuestas en relación con la eliminación gradual de todas las ODSs. Esto indica que "la producción y el consumo de químicos específicos, a los cuales se les comprobó que no eran nocivos para la capa de ozono, podrían ser permitidos luego de la evaluación, realizando algunos ajustes al Protocolo" (UNEP, 2007b).

Comparando la Figura 2 y la Figura 3, así como las opciones a tener en cuenta y las consecuencias del agotamiento del ozono atmosférico y el cambio climático, se sugiere una mayor dificultad y una mayor urgencia para la mitigación del calentamiento global. Estas comparaciones desafían la rutinaria eliminación de las escasas opciones que tienen una influencia insignificante (o incluso imperceptible) sobre el ozono atmosférico, pero

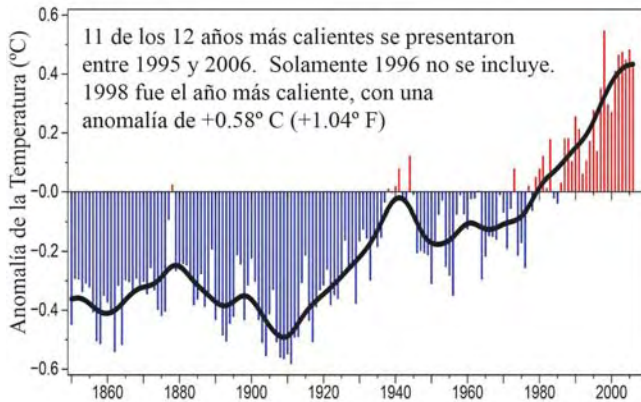


Figura 3.

también el significativo (o incluso fuerte) potencial para mitigar el cambio climático global. Ambos problemas ambientales son importantes, pero la ausencia de candidatos ideales que solucionen ambos problemas en forma conjunta, sin degradar la seguridad, requiere un equilibrio entre los objetivos.

Aunque es especulativo, los creadores del Protocolo de

Montreal probablemente habrían puesto más cuidado en la amplia eliminación de los químicos de acuerdo a su clase, que a través de la determinación individual, si hubieran tenido la conciencia que tienen actualmente sobre la severidad del calentamiento global y el reconocimiento de las limitaciones de respuesta del momento. Sin embargo, el protocolo aseguró los futuros ajustes con base en evaluaciones científicas, lo cual ofrece una opción (aunque políticamente difícil) para las revisiones para tratar los pocos, pero significativos, casos de este tipo.

Otros problemas surgen en las compensaciones ambientales. El principal reemplazo seleccionado por los fabricantes para el R-22, que es actualmente el refrigerante de mayor uso, es el R-410A (una combinación de R-32 y R-125 de HFCs). Aunque este sustituto ofrece prácticamente cero ODP, aumenta el GWP en 16% (de 1810 a 2100 para integración de 100 años) y disminuye la eficiencia alcanzable para los acondicionadores de aire convencionales con ciclos simples en 6% (Calm y Domanski, 2004). Los refinamientos del producto hacen posible ajustar (o incluso mejorar) las eficiencias de las condiciones estándares de clasificación, especialmente con la explotación de la transferencia térmica superior de la mezcla, pero es menor la oportunidad para una futura mejora en el desempeño.

Además, la eficiencia del R-410A se degrada más rápidamente que la del R-22 a mayores temperaturas ambientales que se acercan a la temperatura crítica del R-125, así que la máxima demanda de energía es mayor con el R-410A para sistemas de enfriamiento de aire para las mismas eficiencias estacionales clasificadas. Esa desventaja es especialmente significativa cuando consideramos la costosa generación de electricidad, aunque es más sostenible. Igualmente, el R-32 y algunas otras mezclas de R-32 (aunque son marginalmente inflamables) evitan esta preocupación y ofrecen mayores eficiencias y menores niveles de GWP (Calm y Domanski, 2004).

Las fluoro-olefinas, al igual que las consideradas como refrigerantes automotrices de bajo nivel de GWP, generalmente son más reactivas que los compuestos, con solamente enlaces simples de carbono-carbono. Esta reactividad implica una menor duración en la atmósfera, menores niveles de ODP (para aquellos que contienen cloro, bromo o yodo) y menor nivel de GWP, pero también implican menor estabilidad y mayor toxicidad. Igualmente, los químicos con los menores niveles de GWP tienden a descomponerse cerca a la superficie, predominantemente en la proximidad al lugar de liberación.

Algunos pueden ser creadores de *smog* otros pueden descomponerse o contribuir directamente o catalíticamente a la formación de otros químicos con mayor nivel de GWP

que el químico original, presentándose por lo tanto mayores niveles indirectos de GWP que directos, y las influencias de temperatura, latitud, altitud e incluso la presencia de otros contaminantes atmosféricos, complican la determinación de los niveles netos de GWPs para ellos.

La resolución de estas complicaciones está más allá del alcance de este documento. El tema se presenta solamente para ilustrar las complejas interacciones y las inevitables compensaciones (compromisos) entre las metas ambientales, incluso más allá de la consideración del agotamiento del ozono y el calentamiento global o entre los impactos de las emisiones relacionadas con refrigerantes ("efecto directo") y las relacionadas con energía (algunas veces identificadas como "efecto indirecto", que no es lo mismo que GWP indirecto).

Conclusiones

Con base en hallazgos científicos, requerimientos regulatorios y las presiones del mercado, una cuarta generación de refrigerantes parece inminente hacia el 2010. Los criterios reguladores de selección para la nueva generación agregarán bajos niveles de GWP (inicialmente 150 o menos y determinado para una integración de 100 años) a los antiguos requerimientos para idoneidad, seguridad y compatibilidad de materiales. Con el reconocimiento del potencial para las preocupaciones ambientales adicionales e implícito para que los fluorquímicos cumplan con los nuevos límites de GWP, la corta duración en la atmósfera también debe ser uno de los criterios. Más importante aún es que la nueva generación debe ofrecer alta eficiencia o el cambio para tratar los bajos niveles de GWP tendrá el efecto inverso y producirá mayores emisiones netas de GHG en lugar de disminuirlas.

Aunque las actuales presiones regulatorias se enfocan en los acondicionadores de aire móviles, la futura ampliación a otras aplicaciones es casi segura. Muchos refrigerantes considerados actualmente como nuevas alternativas, incluyendo muchos HFCs, podrían convertirse en viejos desechos. Dada la escasez de opciones viables, las futuras selecciones de refrigerantes garantizan una consideración colectiva de todos los temas ambientales en conjunto, con evaluaciones integradas en lugar de tratamientos graduales que ponen en riesgo la eliminación de buenas opciones generales para lograr menores impactos (o incluso imperceptibles) para los problemas individuales. ■

Referencias **

Brohan, P., et al., 2006, "Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new dataset

from 1850," Journal of Geophysical Research, 111:D12106.

Calm, J. M., 2002, "Emissions and Environmental Impacts from Air-Conditioning and Refrigeration Systems," International Journal of Refrigeration, 25(3):293-305.

DuPont Fluorochemicals (then identified E. I. duPont de Nemours and Company), circa 1988, Disassembly and Inspection of Compressor in Laboratory Refrigerator Charged with R-134a, report NIST-13, Incorporated, Wilmington, DE, USA.

Evans, O., 1805, The Abortion of a Young Steam Engineer's Guide, Philadelphia, PA, USA.

**Consultor de Ingeniería*

Correo electrónico: jmc@JamesMCalm.com

*** Éstas son algunas de las referencias realizadas por el autor. Si desea conocer las demás puede dirigirse a la página www.acrlatinoamerica.com*