

## CO<sub>2</sub> como refrigerante: del pasado al futuro

### CO<sub>2</sub> as refrigerant: from the past to future

J. M. Belman-Flores \* y V. Pérez-García\*

#### RESUMEN

En años recientes y debido a la problemática que ha originado el calentamiento mundial, en el campo de la refrigeración y climatización se ha incrementado el interés por utilizar refrigerantes naturales e hidrocarburos con bajo potencial de calentamiento mundial, este es el caso de la utilización del CO<sub>2</sub> como fluido frigorígeno que ha sido visto como una alternativa adecuada a los actuales refrigerantes en la comunidad científica. Hoy en día, el CO<sub>2</sub> cada vez está retomando presencia en el campo de la refrigeración y climatización a nivel internacional, así pues, el presente trabajo tiene la finalidad de dar a conocer su potencial como refrigerante natural, las causas por las cuales este fluido fue relevado momentáneamente por refrigerantes clorofluorocarbonados y su renacer en pleno siglo XXI. Además, se plantea su aplicación en la generación de frío en nuestro país mediante la tecnología de compresión de vapor basado en ciclo transcrito.

#### ABSTRACT

In recent years, and due to problems resulting from global warming, interest has grown in the fields of refrigeration and air conditioning, specifically regarding the use of natural refrigerants and hydrocarbons with low potential for global warming. Such is the case of the use of CO<sub>2</sub> as a cold fluid, which has been considered in the scientific community as an adequate alternative to common refrigerants. Nowadays, the use of CO<sub>2</sub> in the areas of refrigeration and air conditioning has been recognized at international levels. Therefore, this work aims to show its potential as a natural refrigerant, the causes why this fluid was temporarily replaced by chlorofluorocarbon refrigerants, and its reappearance in the XXI century. It also proposes the use of CO<sub>2</sub> in air conditioning in our country by using vapor compression technology, based on the transcritical cycle.

#### INTRODUCCIÓN

El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) es uno de los compuestos más importantes en la naturaleza y es conocido desde el primer siglo de la humanidad. Los romanos descubrieron sus efectos letales cuando se presenta en altas concentraciones en lugares donde la recirculación de aire es baja. Conocieron su peligrosidad al mantener contacto con él ya que podían observar como los hombres caían muertos al mantener contacto durante largo tiempo con el gas. Debido a que el exceso de CO<sub>2</sub> en recintos cerrados se manifiesta físicamente como una nube densa, ellos pensaron que se trataba de una presencia extraña y lo llamaron “espíritus letales”.

Como refrigerante, el CO<sub>2</sub> comenzó a ser utilizado a mediados del siglo XVIII cuando dio inicio la refrigeración mecánica. En 1744, Joseph Priestley disolvió por primera vez el CO<sub>2</sub> en agua obteniendo una disminución de temperatura del líquido, por lo cual infirió que el fluido poseía propiedades termodinámicas convenientes para que fuera utilizado en refrigeración. Años más tarde, el médico inglés William Cullen quien trabajaba en la Universidad de Glasgow, se interesó en el fenómeno de la evaporación

Recibido: 3 de noviembre de 2012

Aceptado: 31 de marzo de 2013

#### Palabras clave:

Refrigeración; dióxido de carbono; ciclo transcrito; calentamiento global.

#### Keywords:

Refrigeration; carbon dioxide; transcritical cycle; global warming potential.

\*Departamento de Ingeniería Mecánica, División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato. Carretera Salamanca-Valle de Santiago km 3.5+1.8, Comunidad de Palo Blanco, C.P. 36885, Salamanca, Gto. México. Tel.: +52 (464) 6479940 Ext. 2419; fax: +52 (464) 6479940, ext. 2311. Correos electrónicos: jfbelman@ugto.mx, eniac04@hotmail.com

de líquidos y realizó muchos experimentos en los que hervía líquidos bajo vacío. Observó que independientemente de las condiciones ambientales se podía producir hielo mecánicamente mediante la evaporación de líquidos volátiles.

A comienzos del siglo XIX, Oliver Evans propuso el concepto de sistema de refrigeración mediante compresión mecánica y no fue sino hasta mediados de este siglo que Alexander Twining, bajo las experiencias previas de los personajes anteriormente citados, propuso el uso del CO<sub>2</sub> como refrigerante en una patente documentada en 1850 (Bodinus, 1999). Mientras esto sucedía en Europa, en América, en 1867 el inventor de origen estadounidense Thaddeus S. C. Lowe describió cómo el CO<sub>2</sub> podría ser utilizado en la refrigeración y debido a esto recibió una patente inglesa (Thévenot, 1979). Sin embargo, no plasmó sus conocimientos en ningún prototipo, (Donaldson & Nagengast, 1994). En 1881 Carl Linde construyó la primera máquina utilizando CO<sub>2</sub> como fluido de trabajo, (Aarlién, 1998). Cinco años después, en 1886, en Brunswick, Alemania, Franz Windhausen patentó un compresor para una máquina de refrigeración que utilizaba CO<sub>2</sub> y la compañía J&E Hall compró la licencia para construirlo, asimismo, fue esta compañía quien también construyó el primer compresor de CO<sub>2</sub> de doble etapa (Cavallini & Steimle, 1998). En 1897, Sabroe construyó un compresor de CO<sub>2</sub> y desarrolló el primer refrigerador doméstico. Es así que el uso del CO<sub>2</sub> fue cada vez más extenso teniendo su auge precisamente durante este siglo haciéndose presente en vitrinas frigoríficas, mercados de alimentos, barcos de pasajeros y pesqueros y en la climatización de teatros, hospitales y trenes en Europa; ya que otros fluidos como el amoníaco y el dióxido de azufre fueron considerados tóxicos, inflamables y legalmente su uso fue restringido para estas aplicaciones.

De tal manera, durante todo el siglo XIX el CO<sub>2</sub> fue el refrigerante que dominó todo el mercado de la refrigeración y climatización en Europa y parte de América, sin embargo, en el primer cuarto del siglo XX tras la finalización de la primera guerra mundial se desarrollaron nuevos descubrimientos, entre ellos, refrigerantes sintéticos que ofrecían un mayor desempeño energético en los sistemas de compresión mecánica. Los nuevos refrigerantes tuvieron una gran campaña de marketing y difusión, ofrecían sistemas de refrigeración con elementos menos robustos y con una mayor eficiencia energética que el CO<sub>2</sub>. A partir de aquí, inició el declive del refrigerante rey del siglo XIX que no fue capaz de superar a las nuevas sustancias que

a todas luces eran superiores y marcaban una gran diferencia. La discontinuación del CO<sub>2</sub> fue ocurriendo de manera paulatina a partir de 1930, en parte por la incapacidad de desarrollar tecnologías que hicieran el CO<sub>2</sub> competente frente a los nuevos refrigerantes y por otra las nuevas sustancias conocidas como Cloro-fluorocarbonos (CFC's) que ofrecían altos desempeños energéticos y la posibilidad de utilizar equipos de intercambio de calor ligeros y compactos. Finalmente, el CO<sub>2</sub> dejó de ser un refrigerante competitivo a finales de 1950 y fue delegado por los CFC's quienes se apoderaron del mercado mundial.

Durante casi 50 años, los CFC's dominaron el mercado de la refrigeración, sin embargo, en 1974 tras los resultados de las investigaciones de los científicos Mario Molina y Sherwood Rowland, fue demostrado que estas sustancias destruyen el ozono estratosférico y el uso de las mismas estaba produciendo un agujero en la capa de ozono de nuestro planeta. Por lo cual, a partir de esto, la comunidad científica empezó a visualizar el uso de otras sustancias que no causaran daño al ambiente. Es así que llegaron los Hidrofluorocarbonos (HFC's) quienes no favorecen a la destrucción del ozono estratosférico, pero que sí lo hacen, y en gran medida, al calentamiento global. Hoy en día, las sustancias que en el pasado fueron utilizadas como los refrigerantes naturales están siendo retomadas para su uso, ya que a través de ellas se garantiza que no existirá daño al ambiente, ni que se contribuirá al calentamiento global, aunque algunas de ellas resultan ser tóxicas e inflamables en cierta medida.

Basado en el problema de los CFC's y HFC's, en 1980, Gustav Lorentzen creyó posible el renacer del CO<sub>2</sub> como fluido refrigerante y patentó una aplicación para este frigorígeno, la cual fue el ciclo transcrito de refrigeración (WIPO Patent No. 1990007683, 1990). La figura 1 ilustra el ciclo de refrigeración usando CO<sub>2</sub> con una mejora, la cual es la inclusión de un intercambiador de calor (indicado con el número 12) conocido como intercambiador intermedio y que produce un incremento en el desempeño energético del ciclo. El sistema transcrito consiste de un compresor (10) conectado en serie con un enfriador de gas (11), un intercambiador a contraflujo (12) y una válvula de estrangulamiento (13). La válvula puede ser reemplazada de manera opcional por un dispositivo de expansión. Un evaporador (14), un recipiente de líquido (16) conectado en la etapa de baja al intercambiador a contraflujo (12) y a la salida del evaporador en el punto (15).

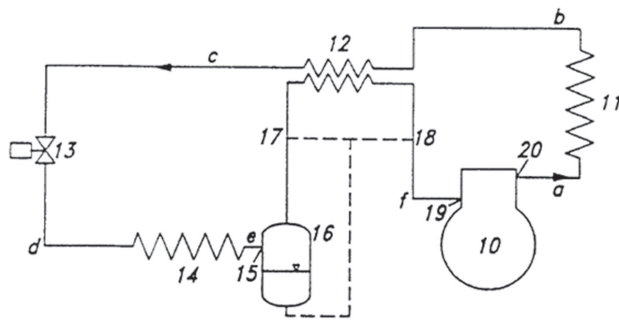


Figura 1. Ciclo transcrítico con intercambiador intermedio de Gustav Lorentzen (esquema original). (Patente de invención No. ES 2 025 443, 1992).

El intercambiador a contraflujo no es absolutamente necesario para el funcionamiento del ciclo, sin embargo, el uso de este elemento mejora el rendimiento del ciclo. Para el regreso del aceite al cárter del compresor, una línea de líquido del recipiente (16) (mostrada con una línea punteada) es conectada a la línea de succión o antes del intercambiador a contraflujo (12), en (17) o (18), o en cualquier lugar entre estos puntos. El flujo del líquido, es decir, el refrigerante y aceite, es controlado por un adecuado dispositivo de restricción de flujo de líquido.

En cuanto al funcionamiento del ciclo, el refrigerante entra al compresor como vapor sobrecalentado y se comprime por encima de su presión crítica (a); a continuación se enfría en el intercambiador principal (b). Después de ser subenfriado (c), entra en el dispositivo de expansión donde su presión y temperatura caen de forma drástica debido al efecto de estrangulamiento (d). Luego el refrigerante a temperatura baja entra al evaporador donde se evapora absorbiendo calor del espacio refrigerado. Un segundo enfriador (12) permite recalentar el gas saturado que sale del evaporador (e). Para evitar que el refrigerante líquido se introduzca en el compresor es necesario colocar un depósito de líquido (16). El ciclo se completa cuando el refrigerante sale del depósito (f) y entra nuevamente al compresor.

### CO<sub>2</sub> vs CFC's

La mayor parte de los átomos de oxígeno en la atmósfera son moléculas biatómicas cuyo símbolo químico es O<sub>2</sub>. En ciertas circunstancias, tres átomos de oxígeno pueden unirse para formar el ozono, un gas con fórmula química O<sub>3</sub>. El ozono está presente en la atmósfera de manera natural y su concentración varía con la altitud (United Nations Environment Programme [UNEP], 2001). Se encuentra concentrado a una

altura entre 25 km y 30 km sobre la superficie de la Tierra en una zona conocida como estratósfera, dicha concentración se le conoce como capa de ozono.

La capa de ozono es importante debido a que es la encargada de absorber ciertas longitudes de onda de radiación ultravioleta del Sol, reduciendo su intensidad sobre la superficie de la Tierra. Sin la capa de ozono estas longitudes de onda entrarían de manera directa y causarían daños en los ojos de los habitantes del planeta, así como cáncer de piel, se reduciría la eficiencia del sistema inmunológico del cuerpo, se alteraría la rapidez de crecimiento de las plantas y el equilibrio entre los ecosistemas terrestres y marinos, se aceleraría la degradación de algunos plásticos y otros materiales; por lo que cuidar la capa de ozono es de vital importancia y el producir sustancias que generen un daño a la misma representa una autodestrucción de la humanidad.

Los CFC's son compuestos químicos creados por el hombre que dañan la capa de ozono; tienen dos propiedades específicas: estables en la atmósfera baja (tropósfera) y contienen cloro o bromo. Su estabilidad les permite difundirse gradualmente hacia la estratósfera donde empiezan a ser desfragmentados por la radiación solar. Esta desfragmentación libera radicales cloro y bromo que son los causantes de la destrucción en cadena de cientos de miles de moléculas de ozono y así debilitar la capa formada por este elemento tan útil para los habitantes del planeta. Estos compuestos o sustancias reciben el nombre de Sustancias Agotadoras del Ozono (SAO).

Otro impacto importante que los gases refrigerantes tienen sobre el medio ambiente es su Potencial de Calentamiento Mundial (GWP, por sus siglas en inglés). Este parámetro es una estimación del calentamiento de la atmósfera y está dado en función del incremento de temperatura en la atmósfera, que produce la liberación de una unidad de gas respecto al calentamiento que se tendría por la liberación de la misma cantidad de CO<sub>2</sub>. Los gases refrigerantes empleados hace varias décadas eran los CFC's y por tanto son considerados como SAO, posteriormente surgieron los HFC's los cuales no son dañinos a la capa de ozono pero contribuyen de manera sustancial al calentamiento mundial. Hoy en día, los CFC's han sido eliminados en Europa por poseer un alto Potencial Destructor del Ozono, (ODP por sus siglas en inglés) y los refrigerantes HFC's están siendo regulados por poseer un GWP considerable. La tendencia es hacia refrigerantes que no sean agotadores del ozono y tengan un GWP bajo (Calm, 2009).

Ante este panorama, los sustitutos por excelencia parecen ser los refrigerantes naturales debido a que son los que sin duda, cumplen con esas características ambientales. El reto consiste en desarrollar o implementar mecanismos adecuados para maximizar la eficiencia de las instalaciones generadoras de frío que utilicen refrigerantes inocuos, tal es el caso del  $\text{CO}_2$ . Este candidato toma ventaja sobre sus competidores más cercanos que son el amoníaco y los hidrocarburos por no poseer toxicidad a niveles de concentración bajo y por su ausente inflamabilidad.

### Características del $\text{CO}_2$

Una de las características que presenta el  $\text{CO}_2$  sobre otros refrigerantes es la presión de operación la cual es superior a todos los refrigerantes convencionales y de nueva generación (aproximadamente diez veces mayor a la del amoníaco, R404A, R134a, R22, R12 y R1234yf). Esta peculiaridad obliga al uso de equipo especial para su manejo, sin embargo, al mismo tiempo ofrece ventajas que ningún refrigerante tiene. La alta presión lo convierte en un gas de alta densidad de acuerdo a sus propiedades termo-físicas, esto hace que se pueda conseguir un efecto refrigerante mayor con poca masa circulando en el sistema de compresión de vapor.

En un sistema frigorífico, lo ideal es que los fluidos aceite y refrigerante sean totalmente miscibles uno en el otro, pues ello permite que el aceite partiendo del compresor circule por todo el circuito y regrese nuevamente al compresor en un 100%. En este contexto, el aceite tipo Polyolester (POE) cumple con esta característica, sin embargo, se ha encontrado una notable disminución en el coeficiente de transferencia de calor cerca de la temperatura pseudocrítica, (Zingerli & Groll, 2000). Es por ello que se han realizado estudios con aceite tipo Polyalkalinos (PAG) que solo es parcialmente miscible, encontrando que la disminución en el coeficiente de transferencia de calor se debe principalmente a parámetros como: la temperatura, el flujo másico y el diámetro de la tubería, siendo mayor la pérdida de transferencia de calor cuando el diámetro en la tubería se disminuye (Dang, Ino, Kukuoka & Hihara, 2007).

La corrosión en sistemas de refrigeración usando  $\text{CO}_2$  es un factor a considerar, sobre todo cuando se utilizan tuberías de acero al carbono. Wu *et al.*, (2004) realizaron un estudio demostrando la formación de una película sobre la pared de una tubería de acero al carbono a condiciones supercríticas, algunos otros investigadores (Chen & Jepson, 1999, Heuer & Stub-

bins, 1999; Nesic, Postlethwaite & Olsen, 1996), han realizado estudios sobre corrosión a condiciones de presión por debajo del punto crítico encontrando de igual manera corrosión en tuberías.

### Ventajas del $\text{CO}_2$

El  $\text{CO}_2$  presenta diversas ventajas respecto a otros refrigerantes, las cuales son citadas a continuación: sus propiedades termo-físicas son excelentes así como sus propiedades de transporte comparadas con otros refrigerantes. Además, es ambientalmente amigable, no es inflamable, ni tóxico y es químicamente inactivo.

Las propiedades físicas más importantes del  $\text{CO}_2$  son tres y pueden observarse en el diagrama de fases que se muestra en la figura 2.

Dos de ellas están indicadas como el punto triple y punto crítico, una tercera se indica mediante las siglas PSHS, punto de sublimación del hielo seco, que ocurre a presión atmosférica y a una temperatura de  $-78.2^\circ\text{C}$ . De éstas, la que más llama la atención es el punto crítico, el cual ocurre a temperaturas que son fácilmente alcanzables en condiciones ambientales en muchos lugares cálidos. El hecho de que las condiciones de temperatura y presión críticas sean las que se muestran en el diagrama de fases del  $\text{CO}_2$ , hace que en el ciclo de refrigeración por compresión de vapor el proceso de rechazo de calor al ambiente no implique una condensación del fluido de trabajo (Cavallini, 2004).

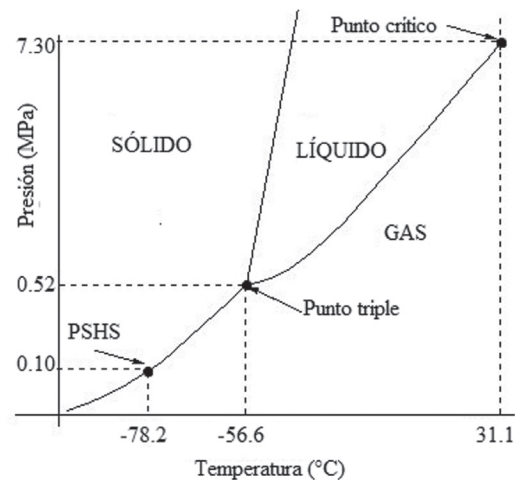


Figura 2. Diagrama de fases del  $\text{CO}_2$ .

En la refrigeración por compresión de vapor es deseable tener al fluido de trabajo con una presión de entrada al compresor que sea igual o mayor que la

atmosférica (Burghardt, 1984), de modo que el aire no se infiltre en el sistema, el CO<sub>2</sub> cumple con esta característica básica. En la tabla 1 se presentan las propiedades físicas de algunos refrigerantes. Puede verse la diferencia notable del CO<sub>2</sub> (cuya designación es R744, según la Sociedad Americana de Aire Acondicionado y Refrigeración) en cuanto a la capacidad de calor volumétrica, lo que implica utilizar menor cantidad de masa de refrigerante que en cualquier otro sistema para conseguir el efecto de refrigeración deseado, superando en esto a todos sus competidores. Se debe señalar que después del amoníaco en cuestión ambiental es el segundo mejor, sin embargo, el amoníaco es tóxico para el ser humano por lo que en materia de toxicidad el CO<sub>2</sub> es la mejor opción.

**Tabla 1.**  
Propiedades físicas de algunos refrigerantes.

Asignación Numérica	Punto de ebullición (a 1 atm), K	Temp. crítica, K	Presión crítica, MPa	Capacidad de calor volumétrica, kJ/m <sup>3</sup>	Densidad (20 °C y 1 atm), kg/m <sup>3</sup>	Grupo de seguridad*	ODP /GWP
R134a	246.85	374.2	4.12	2 868	4.336	1	0/1 300
R290	231	369.8	4.31	3 907	1.865	2	0/3
R744	194.6	304.1	7.38	22 545	1.839	1	0/1
R22	232.4	369.1	4.98	4 356	3.651	1	0.05/1 700
R717	239.8	406.1	11.42	4 382	0.716	2	0/0
R410A	325.85	343.3	4.85	6 753	3.062	1	0/1 740
R407C	229.35	359.2	4.70	4 029	3.639	1	0/1 610

\* Grupo de seguridad 1: toxicidad despreciable, no inflamable.

\* Grupo de seguridad 2: tóxico, inflamable, o ambas cosas.

Las propiedades termodinámicas de los fluidos son esenciales para el diseño de equipos, particularmente con respecto a los requerimientos energéticos, equilibrio de fases y determinación del tamaño de los mismos (Kim, Pettersen & Bullard, 2004).

En la región transcritical, la entalpía y entropía disminuyen con la temperatura con cambios bruscos cerca del punto crítico. La presión influye en la entalpía y entropía por arriba de la temperatura crítica, mientras que su efecto es pequeño por debajo de ésta. La principal característica que condicionará el diseño de una instalación usando CO<sub>2</sub> son las elevadas presiones a las que opera el sistema (Cabello & Albert, 2007).

La densidad es otro factor importante en el CO<sub>2</sub>, puesto que a densidades altas se reduce el desplazamiento requerido por el compresor y el diámetro de las tuberías de conexión. El CO<sub>2</sub> presenta densidades altas a presiones de operación convencionales, por lo cual el uso de este refrigerante implica instalaciones con diámetros de tubería pequeños.

La tensión superficial en los refrigerantes influye en la ebullición nucleada y en las características del flujo en dos fases. Un valor de tensión superficial bajo reduce el sobrecalentamiento requerido para la nucleación y crecimiento de burbujas de vapor, lo cual afectará la transferencia de calor de manera positiva. La tensión superficial del CO<sub>2</sub> es baja comparado con los otros refrigerantes con los que compete directamente, lo

cual hace que este fluido sea considerado como adecuado en términos energéticos.

Tiene un coeficiente de transferencia de calor entre 60% y 70% mayor a los refrigerantes convencionales, excepto el amoníaco (Padalkar & Kadam, 2010). La capacidad volumétrica del CO<sub>2</sub> es 3 o 4 veces mayor que los demás refrigerantes. Por lo tanto, la cantidad de masa de refrigerante se reduce considerablemente así como el tamaño del compresor, el de los equipos de intercambio de calor y la tubería, comparado con otros refrigerantes.

### Desventajas del CO<sub>2</sub>

De los refrigerantes más utilizados en la industria, solo el amoníaco es el menos pesado que el aire, lo que significa que en caso de fugas éste desplazará al aire hacia arriba quedando vulnerables las personas que se encuentren operando las instalaciones (solo en caso de que la fuga sea mayor y la cantidad de refrigerante sea excesiva).

El CO<sub>2</sub> no solamente es considerado como asfixiante, además es un agente narcótico y vasodilatador cerebral. El vasodilatador es la sustancia con la cual se relajan las paredes de los vasos sanguíneos y reduce la presión en la sangre. Si el porcentaje de CO<sub>2</sub> es mayor en el aire de una habitación, entonces los glóbulos rojos se saturan con CO<sub>2</sub> y pierden la habilidad de intercambiar CO<sub>2</sub> por oxígeno fresco. El porcentaje del CO<sub>2</sub> en el aire es de 0.036%, si la concentración va por encima del 3% sobre el volumen, entonces este causa hiperventilación, al 5% causa narcosis y al 10% causa que la persona entre en coma. Sin embargo, la industria presenta avances tecnológicos en materia de seguridad con refrigerantes más pesados que el aire e inclusive tóxicos.

Es claro que el CO<sub>2</sub> como cualquier otro refrigerante no es una sustancia ideal para ser considerada en refrigeración, sin embargo, desde el punto de vista ambiental presenta una opción latente que puede ser considerada para su utilización.

### Aplicaciones del CO<sub>2</sub> en el mundo

El CO<sub>2</sub> tiene diversas aplicaciones, una de ellas es en la refrigeración. En este campo se puede considerar la refrigeración industrial, empleándose en diversos procesos de extracción de calor en la industria láctea, refresquera, entre otras (donde empresas como Nestlé, Coca-Cola, Mc-Donalds y Univer se hacen presentes), (Correa, 2007); la refrigeración automotriz donde su aplicación es en la climatización del automóvil (Mu, Chen & Chen, 2003); la refrigeración en supermercados para vegetales o productos que necesiten estar a cierta temperatura (Sawalha, 2005) y la producción de frío empleada en actividades recreativas como el patinaje sobre hielo.

A medida que la tecnología avanza se encuentran instalaciones más compactas que operan con CO<sub>2</sub> que las que se empleaban hace unas cuantas décadas. Hoy en día, la tecnología ha avanzado tanto que, es posible tener sistemas de refrigeración por compresión de vapor que operan con CO<sub>2</sub> en automóviles. Debido a sus propiedades termodinámicas, en los pasados Juegos Olímpicos de Beijing 2008, el CO<sub>2</sub> fue elegido para ser utilizado como fluido refrigerante en el sistema de acondicionamiento de 1 000 autobuses (Correa, 2008). En este ámbito, en Alemania, en junio de 2009 la compañía de transporte Berliner Verkehrsbetriebe (BVG) puso en operación el sistema de calefacción de siete autobuses en la ciudad de Berlín que utilizan CO<sub>2</sub> como fluido refrigerante (Henrik, 2010).

En climatización, el uso del CO<sub>2</sub> es todavía más extenso debido a que en esta área, este compuesto sí que es altamente competitivo e incluso, mejor que cualquiera de sus competidores debido a sus excelentes propiedades de transferencia de calor. Bombas de calor son el principal enfoque que ha tenido la tecnología basada en CO<sub>2</sub>.

El uso del CO<sub>2</sub> en estado transcrito no solo está restringido a refrigeración industrial o comercial, también se utiliza en la industria alimenticia en la extracción de aceites en bio-materiales tales como hierbas, plantas naturales como leguminosas, nueces y palmas entre otros (Norhuda & Jussof, 2009). También es utilizado como disolvente para el procesamiento de polímeros fundidos, formación de composites y es-

puma micro-celular (Nalawade, Picchioni & Janssen, 2006). En la industria médica como esterilizador en el trasplante de tejido (Webb, 2009) y en la industria aeronáutica en los sistemas de enfriamiento de los cohetes (Urbano, Pizzarelli & Nasuti, 2009).

### El CO<sub>2</sub> como refrigerante en México

En México más del 90% de la refrigeración industrial y aire acondicionado se basa en la tipología de la compresión mecánica usando refrigerantes sintéticos y amoniaco (Correa, 2007). Bajo este contexto, desde hace tiempo se ha trabajado por parte de las autoridades correspondientes a través de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) en reducir la producción de CFC's. En el 2005, la planta más grande de América Latina ubicada en México cerró la producción de CFC's y con ello se consiguió reducir en un 12% la producción mundial y en un 60% la producción continental de estos compuestos (SEMARNAT, 2007). Esto sin duda fue un logro muy importante, sin embargo, ello no quiere decir que México está libre del uso de estos compuestos tan dañinos para el ambiente. Es importante conocer que el grado de contaminación que se tiene por el uso de CFC's y HFC's es muy elevado y por ello, países desarrollados han cambiado y modificado sus equipos de refrigeración y climatización para que utilicen CO<sub>2</sub> como refrigerante. Las pruebas sobre este gas realizadas en diciembre de 2009, han demostrado que es posible emplear el CO<sub>2</sub> en unidades pequeñas para ser adaptadas a refrigeradores y con una eficiencia tan buena como la que proporcionan fluidos sintéticos como el R134a y el R1234yf (Kimura, Yamaguchi & Sunao, 2010).

No obstante, en México actualmente el uso del CO<sub>2</sub> como refrigerante natural en instalaciones operando en condiciones por arriba del punto crítico (también conocidas como instalaciones transcriticas) está muy alejado, tan solo el uso del R22 y el R141b cubren el 98% de los refrigerantes utilizados y que de acuerdo a lo pactado en el protocolo de Montreal, se tiene especulado que la eliminación de estos refrigerantes de manera paulatina empiece a verse reflejada hacia el 2015, marcando un porcentaje de eliminación del 67.5% en el año 2030 (SEMARNAT, 2007). México es consumidor del 88% de SAO, todas ellas son debido al uso de los HCFC's, aportando un total de 21 millones de toneladas equivalentes de CO<sub>2</sub>. En la figura 3 se indica la evolución del consumo de estas sustancias a partir de 1990.

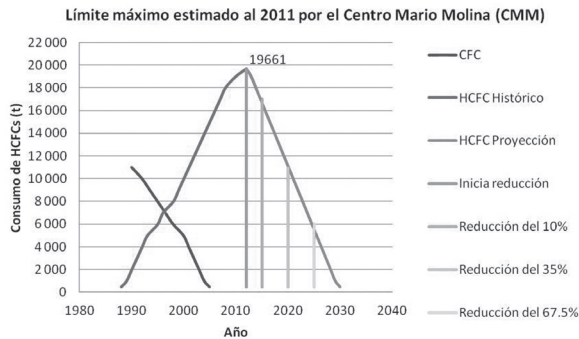


Figura 3. Propuesta de eliminación del consumo de los HCFC's para el 2030 (Centro Mario Molina [CMM], 2008).

Considerando el consumo total reportado en el 2007 de 19 471 t al año y manteniendo una tendencia de crecimiento que fue calculada a lo largo del periodo de 0.34% en el 2011, el consumo máximo de HCFC's estimado en ese año fue de 19 661 t, cifra a partir de la cual se construye la reducción en el uso de estos refrigerantes, considerando las fechas establecidas en el Protocolo de Montreal para su eliminación (CMM, 2008). La información anterior pone de manifiesto que México carece de instalaciones que operan bajo ciclo transcrito. Actualmente, en la División de Ingenierías de la Universidad de Guanajuato, México se está construyendo la primera instalación de este tipo, contribuyendo de manera positiva al fomento y uso de este tipo de instalaciones cuya aplicación es para temperatura media, directamente en la conservación de alimentos y para solventar problemáticas en procesos como el de la producción de la cerveza e industria vinícola, contribuyendo con esto a la sustentabilidad en el campo de la refrigeración.

## CONCLUSIONES

La nueva generación de refrigerantes debe cumplir con condiciones especiales, no solo de ser ambientalmente amigables, sino que además deben proporcionar eficiencias energéticas altas en las instalaciones donde sean utilizados, ello conlleva a una reestructuración en las instalaciones actuales debido a que la mayor parte de las instalaciones de generación de frío en el mundo aun utilizan refrigerantes sintéticos. México no es la excepción y este trabajo dio a conocer las diversas aplicaciones que el CO<sub>2</sub> tiene como refrigerante y lo que se está realizando en el mundo, así como la propuesta desarrollada en la construcción de una instalación experimental en la Universidad de Guanajuato. El saltar de la era de la "refrigeración sintética" a la "refrigeración natural" sin duda llevará al-

gunos años en México, pero es importante conocer lo que se puede conseguir con este refrigerante natural y mejor aún, el daño que se puede evitar al planeta haciendo uso del mismo.

El reto actual se concentra en la optimización energética de las instalaciones de generación de frío que emplean CO<sub>2</sub> como refrigerante y puedan alcanzar elevados coeficientes de desempeño. La otra parte que debe atenderse es la seguridad en cuanto a las altas presiones que alcanza este fluido, pero sin duda alguna no es una restricción que impida el uso del CO<sub>2</sub> en los sistemas de refrigeración, ya que el aparente problema de la presión alta de operación es cada vez más fácil solventarlo debido a la aparición de materiales aptos para estas condiciones de operación.

## REFERENCIAS

- Aarlien, R. (1998). *Kohlendioxid - Besonderheiten und Einsatzchancen als Kältemittel/ Statusbericht des Deutschen Kälte- und Klimatechnischen Vereins. Nr 20. DKV. Stuttgart: DKV.*
- Bodinus, W. S. (1999). The rise and fall of carbon dioxide systems. In: H. M. Will (Ed.), *The first century of air conditioning* (pp. 29-34.) Atlanta, GA: ASHRAE.
- Burghardt, M. D. (1984). *Ingeniería Termodinámica*, (2da. Edición). México: Harla.
- Cabello, J. & Albert, A. (2007). *El uso del CO<sub>2</sub> como refrigerante en centrales frigoríficas*. España: PECOMARK.
- Calm, M. J. (2009). La próxima generación de refrigerantes (II), *ACR Latinoamérica*, 12(1):18-25.
- Cavallini, A. (november, 2004). Properties of CO<sub>2</sub> as a refrigerant. In *European Seminar-CO<sub>2</sub> as a refrigerant: theoretical and design aspects*, Milan, Italy.
- Cavallini, A. & Steimle, F. (june, 1998). Natural Working Fluids in a Historic Perspective. In *Proceedings Natural Working Fluids '98, IIR-Gustav Lorentzen Conference, Oslo, Norway*.
- Centro Mario Molina, Para Estudios Estratégicos sobre Energía y Medio Ambiente A.C. (CMM). (2008). *Evaluación de los usos de HCFCs en México en el sector de Refrigeración y Aire Acondicionado*. Recuperado de <http://centromariomolina.org/wp-content/uploads/2012/05/HCFCs-resumen.pdf>. Consultado el 19 de enero de 2013.
- Chen, Y. & Jepson, W. P. (1999). EIS measurement for corrosión monitoring under multiphase flow conditions. *Electrochimica Acta*, 44(24), 4453-4464.
- Correa, J. A. (2007). La Refrigeración: rompiendo el hielo. *Energía a Debate*, 21, 44-48. Recuperado de [http://energiaadebate.com/Articulos/agosto\\_2007/la\\_refrigeracion.htm](http://energiaadebate.com/Articulos/agosto_2007/la_refrigeracion.htm). Consultado el 20 de septiembre de 2011.
- Correa, J. A. (2008). *Desafíos en la refrigeración para México*. Recuperado de <http://www.mundohvacr.com.mx/mundo/2008/12/desafios-en-la-refrigeracion-para-mexico/>. Consultado el 20 de septiembre de 2011.
- Dang, C., Ino, K., Kukuoka, K. & Hihara, E. (2007). Effect of lubricating oil on cooling heat transfer of supercritical carbon dioxide. *International Journal of Refrigeration*, 30(4), 724-731.

- Donaldson, B. & Nagengast, B. (1994). *Heat and cold: mastering the great indoors*. Atlanta, GA: ASHRAE.
- Henrik, F. (2010). *BVG fährt mit umweltschonenden Klimaanlage*. Recuperado de <http://www.bvg.de/index.php/de/103842/name/Pressemitteilungen/artikel/764642.html>. Consulted November 15, 2012.
- Heuer, J. K. & Stubbins, J. F. (1999). An xPS characterization of FeCO<sub>3</sub> films from CO<sub>2</sub> corrosion. *Corrosion Science*, 41(7), 1231-1243.
- Kim, M.H., Pettersen, J. & Bullard, C. W. (2004). Fundamental process and system design issues in CO<sub>2</sub> vapor compression systems. *Progress in Energy and Combustion Science*. 30(2), 119-174.
- Kimura, M., Yamaguchi, Y. & Sunao, S. (2010). *Examination of LGWP Refrigerant for Cooling Show*. Japan: SANDEN Corporation.
- Lorentzen, G. (1990). *WIPO Patent No. 1990007683*. Geneva, Switzerland: World Intellectual Property Organization.
- Lorentzen, G. (1992). *Método para regular la capacidad de un ciclo de compresión de vapor y dispositivo acondicionador de aire para automoción. Patente de Invención No. ES 2 025 443*. Madrid, España: Registro de la Propiedad Industrial.
- Mu, J. Y., Chen, J. P. & Chen, Z. J. (2003). System design and analysis of the trans-critical-carbon dioxide automotive air-conditioning system. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 4(3), 305-308.
- Nalawade, S. P., Picchioni, F. & Janssen, L. P. B. M. (2006). Supercritical carbon dioxide as a green solvent for processing polymer melts: *Processing aspects and applications*. *Progress in Polymer Science*, 31(1), 19-43.
- Nesic, S., Postlethwaite, J., & Olsen, S. (1996). An electrochemical model for prediction of corrosion of mild steel in aqueous carbon dioxide solutions. *Corrosion*, 52(4), 280-306.
- Norhuda, I. & Jussof, K. (2009). Supercritical carbon dioxide (SC-CO<sub>2</sub>) as a clean technology for palm kernel oil extraction. *Journal of Biochem Technology*, 1(3), 75-78.
- Padalkar, A. S. & Kadam, A. D. (2010). Carbon Dioxide as Natural Refrigerant, *International Journal of Applied Engineering Research, Dindigul*, 1(2), 261-272.
- Sawalha, S. (2005). Using CO<sub>2</sub> in Supermarket Refrigeration, *ASHRAE Journal*, 47(8), 26-30.
- SEMARNAT (2007). *Logros de México ante el Protocolo de Montreal*. Recuperado de <http://app1.semarnat.gob.mx:8080/sissao/archivos/logros.pdf>. Consultado el 12 de enero de 2013.
- Thévenot, R. (1979). *A history of refrigeration throughout the world / by Roger Thévenot; translated by J.C. Fidler*. Paris: International Institute of Refrigeration.
- United Nations Environment Programme (UNEP), (2001). *Protecting the Ozone Layer*. Vol 4: Foams. Nairobi, Kenya: UNEP
- Urbano, A., Pizzarelli, M. & Nasuti, F., (2009). Numerical analysis of transcritical fluids heating in liquid rocket engine cooling channels. *Aerotecnica Missili & Spazio, Journal of Aerospace Science, Technology and Systems*, 88(1-2), 20-30.
- Webb, S. (2009). Supercritical CO<sub>2</sub> Emerging as Transplant Tissue Sterilization Option. *Scientific American*. Recuperated of <http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=supercritical-co2>. Consulted December 9.
- Wu, S. L., Cui, Z. D., Zhao, G. X., Yan, M. L., Zhu, S. L. & Yang, X. J. (2004). EIS study of the surface film on the surface of carbon steel from supercritical carbon dioxide corrosion, *Applied Surface Science*, 228(1-4), 17-25.
- Zingerli, A., Groll, E. A. (2000). Influence of refrigeration oil on the heat transfer and pressure drop of supercritical CO<sub>2</sub> during in tube cooling. In *Proceedings of the Fourth IIR-Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids at Pardue, IIR, USA*, 269-278.